



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI JARAK
INLET DISTURBANCE BODY TERHADAP ALIRAN
MELALUI *SQUARE DUCT* DENGAN *ELBOW 90°***

AQFHA HARDHIAN S. F
NRP. 2112 100 131

Dosen Pembimbing :
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE
EFFECT OF INLET DISTURBANCE BODY WITH
DISTANCE VARIANT TOWARD THE FLOW
THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW
90°**

AQFHA HARDHIAN S. F
NRP. 2112 100 131

Advisor Lecturer :
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

BACHELOR DEGREE PROGRAM
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI JARAK
INLET DISTURBANCE BODY TERHADAP ALIRAN
MELALUI SQUARE DUCT DENGAN ELBOW 90°**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AQFHA HARDHIAN SANDHITYAWAN FIRRIISQIIA

NRP. 2112 100 131

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT. (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD. (Penguji I)
NIP. 196412281990031002
3. Nur Ikhwan, ST, M.Eng. (Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto (Penguji III)
NIP. 196202161995121001

SURABAYA

JANUARI, 2017

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI JARAK INLET DISTURBANCE BODY TERHADAP ALIRAN MELALUI SQUARE DUCT DENGAN ELBOW 90°

Nama Mahasiswa : Aqfha Hardhian S. F
NRP : 2112 100 131
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRAK

Instalasi-instalasi saluran fluida tidak hanya menggunakan sistem perpipaan dengan pipa lurus, melainkan dapat juga menggunakan pembelokan aliran, penggabungan aliran, ataupun percabangan aliran. Hal tersebut sering kita sebut dengan istilah *fitting* perpipaan. Salah satu penggunaan *fitting* perpipaan adalah dengan menggunakan *elbow* 90°. Pemasangan *fitting* perpipaan ini akan membuat aliran di dalam *elbow* mengalami *pressure drop* yang lebih besar karena adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati aksesoris tersebut. Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi di dalam *elbow* 90° adalah menambahkan sebuah bodi pengganggu silinder *Inlet Disturbance Body (IDB)*.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen dengan model saluran berpenampang bujursangkar (*square duct*) dengan diameter hidrolis ($D_h = 125 \text{ mm}$) yang terdiri dari : *upstream duct* (*straight duct*) dengan panjang ($l = 7D_h$), *Inlet Disturbance Body (IDB)* dengan diameter ($D = 12,5 \text{ mm}$), *elbow* 90° dengan rasio kelengkungan ($R/D_h = 1,5$), dan dilengkapi *downstream duct* (*straight duct*) dengan panjang ($l = 15D_h$), serta *induced draft fan*. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan *pitot static tube*, *inclined manometer*, dan *pressure transducer*. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak ($l/D_h = 0,1 - 0,5$); dan gap konstan ($g/D = 0,2$) dengan Re_{D_h} sebesar $8,74 \times 10^4$ untuk mendapatkan profil kecepatan sepanjang *downstream duct*, *pressure drop* antara *downstream*

duct dan *upstream duct*, serta *pressure drop elbow 90°* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* berupa nilai *pressure coefficient*, koefisien *loss minor elbow 90°* pada variasi nilai Re_{Dh} sebesar $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$.

Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa penempatan *IDB* efektif untuk proses *recovery* aliran dan menanggulangi timbulnya *secondary flow*. Penempatan *IDB* pada saluran dengan jarak $l = 0,1D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk meningkatkan intensitas turbulensi dan menurunkan *pressure drop*, dimana pada sisi *inner outlet elbow 90°* memiliki intensitas turbulensi tertinggi yaitu sebesar 30,92%, sedangkan nilai intensitas turbulensi terendah terjadi pada saluran yang menggunakan *IDB* dengan jarak $l = 0,5D_h$ yaitu sebesar 8,07%. Saluran dengan *IDB* $l = 0,1D_h$ juga memiliki *pressure drop* terendah dengan persentase penurunan nilai *pressure drop* sebesar 17,68% terhadap saluran tanpa *IDB*, sedangkan pada jarak *IDB* $l = 0,5D_h$ memiliki *pressure drop* tertinggi. Secara fungsi Reynolds Number, jarak *IDB* $l = 0,1D_h$ memiliki nilai *koefisien losses elbow 90°* paling rendah dengan dengan persentase penurunan *koefisien losses elbow 90°* sebesar 9,74% terhadap saluran tanpa *IDB*, sedangkan pada variasi tanpa menggunakan *IDB* memiliki nilai *koefisien losses elbow 90°* paling tinggi. Perbedaan nilai *Pressure Coefficient (ΔC_p)* yang cukup signifikan pada *elbow 90°* dengan saluran tanpa *IDB* dan menggunakan *IDB*, dimana didapatkan bahwa ΔC_p pada jarak *IDB* $l = 0,1D_h$ terlihat lebih kecil dibandingkan pada jarak $l = 0,5D_h$ maupun tanpa menggunakan *IDB*.

Kata kunci: *Inlet Disturbance Body (IDB), Profil Kecepatan, Pressure Drop, Square Duct, Elbow 90°*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INLET DISTURBANCE BODY WITH DISTANCE VARIANT TOWARD THE FLOW THROUGH SQUARE DUCT AND SQUARE ELBOW 90°

Name : Aqfha Hardhian S. F
NRP : 2112 100 131
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

ABSTRACT

Many installations of the ducting system are not only use the piping system with straight duct, but it also use to turning the flow, clustering the flow, or divide the flow. It usually called fitting system. One of the using on fitting system is the using of elbow 90°. Installation of fitting system will makes the flow inside elbow 90° consist excess of pressure drop, it caused by the presence of friction loss, separation loss, and secondary flow that occurs after through the accesories. One of the effort to reduce the pressure drop inside elbow 90° is add a body disturbance called Inlet Disturbance Body (IDB).

This research did as an experimental investigation with square duct with hydraulic diameter ($D_h = 125 \text{ mm}$) that consist of : upstream duct (straight duct) with length ($l = 7D_h$), Inlet Disturbance Body (IDB) with diameter ($D = 12,5 \text{ mm}$), elbow 90° with curvature ratio ($R/D_h = 1,5$), and featured by downstream duct (straight duct) with length ($l = 15D_h$), also an induced draft fan. The measurements of this experiment use pitot statis tube, inclined manometer, and pressure transducer. This experiment did with distance variant ($l/D_h = 0,1 - 0,5$) and constant gap ($g/D = 0,2$) with $Re_{D_h} 8,74 \times 10^4$ to obtain the velocity profile along downstream duct, pressure drop between downstream duct and upstream duct, also pressure drop elbow 90° between inlet elbow

90° and outlet elbow 90° in the value of pressure coefficient (C_p), minor losses coefficient of elbow 90° with Re_{Dh} variant $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$.

The results of this experimental study shows that the placement of IDB is effective to recovery process and reduce secondary flow. The placement of IDB in the duct with distance variant $l = 0,1D_h$ is most effective to increase the turbulent intensity and reduce the pressure drop, which in the inner outlet elbow 90° has highest turbulent intensity with percentage 30,92%, whereas the lowest turbulent intensity occurs in the duct with distance variant $l = 0,5D_h$ with percentage 8,07%. Duct with distance variant $l = 0,1D_h$ also has the lowest pressure drop with percentage of reducing pressure drop 17,68% toward the duct without IDB, whereas in the duct with distance variant $l = 0,5D_h$ has the highest pressure drop. Based on the function of Reynolds Number, duct with distance variant $l = 0,1D_h$ has lowest minor losses coefficient of elbow 90° with percentage of reducing minor losses coefficient of elbow 90° 9,74% toward the duct without IDB, whereas in the duct without using IDB has the highest minor losses coefficient of elbow 90°. The difference of Pressure Coefficient (ΔC_p) between duct using IDB and duct without using IDB on elbow 90° shows significant enough, which has obtained that ΔC_p in the duct with IDB $l = 0,1D_h$ seems smaller than distance variant $l = 0,5D_h$ and without IDB.

Keyword : Inlet Disturbance Body (IDB), Velocity Profile, Pressure Drop, Square Duct, Square Elbow 90°.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, khususnya Bapak Yudhi Hari Tiwiyoso dan Ibu Sri Puji Utami yang senantiasa mendoakan, mendorong, dan menyemangati penulis. Terimakasih karena telah menjadi bapak sekaligus ibu terbaik bagi penulis.
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD., Nur Ikhwani, ST, M.Eng., dan Dr. Ir. Heru Mirmanto selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.
4. Sutrisno selaku karyawan Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Fluida yang telah membantu dalam pembuatan alat Tugas Akhir ini.
5. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
6. Saudara kandung penulis, Githa Purwitasari, Yemima Ryzma, dan Argha Yonathan yang selalu mendoakan dan menjadi semangat penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
7. Rekan pengerjaan dan asistensi Tugas Akhir penulis, Rizkia Putra Pratama dan Angga Eka Wahyu Ramadan yang bersedia berjuang bersama untuk Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman angkatan M55 yang senantiasa memberi motivasi, menemani, dan meninggalkan banyak cerita indah bagi penulis selama ini.

9. Teman Riset Wawan Aries Widodo sekaligus teman seperjuangan untuk lulus secepat mungkin yang selalu memberikan dukungan dan bantuan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
10. Teman-teman Mesin Music Club (MMC) Crew yang senantiasa memberikan semangat dan motivasi untuk segera menyelesaikan perkuliahan di kampus Teknik Mesin ITS.
11. Teman-teman JAIL yang senantiasa memberikan motivasi dan mengingatkan penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan di ITS.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah	5
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Saluran Udara (<i>Ducting</i>)	7
2.2 Persamaan <i>Euler</i> Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	8
2.3 Tekanan Statis, Tekanan Stagnasi dan Tekanan Dinamis ..	10
2.4 Bilangan Reynolds	11
2.5 <i>Pressure Coefficient</i> (C_p)	12
2.6 <i>Head Loss</i>	13
2.7 Karakteristik Aliran Fluida di Dalam Pipa	15
2.8 Penelitian Terdahulu	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Penelitian	29
3.2 Peralatan Pendukung	30
3.3 Analisa Dimensi Parameter - Parameter yang Dianalisa	37
3.4 Langkah-Langkah Validasi	41
3.5 Prosedur Pengambilan Data	44
3.6 Urutan Langkah Penelitian	51

3.7 Gambar Peralatan Penelitian	52
3.8 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	54

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 <i>Pressure drop</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i>	55
4.2 Koefisien <i>Losses Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i>	62
4.3 <i>Pressure Coefficient</i> pada <i>Square Elbow 90°</i>	64
4.4 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi <i>Inlet Upstream Straight Duct</i>	69
4.5 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Horizontal	70
4.6 <i>Distribusi Profil Kecepatan Bidang Vertikal</i>	74
4.7 Intensitas Turbulensi pada jarak $x/D_h = 1$	78
4.8 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Penelitian Terdahulu	81

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN



5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86

DAFTAR PUSTAKA	87
-----------------------------	----

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Macam – macam bentuk <i>ducting</i>	7
Gambar 2.2	Gerakan partikel fluida di sepanjang streamline ...	9
Gambar 2.3	Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis	10
Gambar 2.4	Aliran Laminar	15
Gambar 2.5	Aliran Transisi.....	16
Gambar 2.6	Aliran Turbulen.....	16
Gambar 2.7	Profil kecepatan untuk aliran di dalam saluran	17
Gambar 2.8	Terjadinya separasi aliran pada <i>boundary layer</i> ..	18
Gambar 2.9	Terjadinya <i>secondary flow</i> pada belokan	19
Gambar 2.10	a) Posisi pengambilan data pada domain uji b) Mesh pada Volume	19
Gambar 2.11	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ and $z/D_h = 0.0$	20
Gambar 2.12	Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi inner dan outer wall elbow hasil simulasi dan eksperimen	21
Gambar 2.13	Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya	22
Gambar 2.14	<i>Velocity profile</i> pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° dengan variasi <i>curvature ratio</i> ($R/D = 1 - 5$)	22
Gambar 2.15	Skema penelitian (Eduard, 2016)	23
Gambar 2.16	<i>Pressure Coefficient</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square elbow</i> 90° dengan variasi <i>Reynolds number</i> $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ dan variasi sudut bukaan <i>damper</i>	24
Gambar 2.17	Bentuk Geometri Silinder <i>Elips</i> dan Skema Penelitian	25
Gambar 2.18	<i>Mean streamwise velocity profiles</i> pada $X = 100$, 150 , dan 200 mm; $AR = 1$; — tanpa silinder;  $G/B = 0,5$;  $G/B = 1,0$	26

Gambar 2.19	<i>Streamwise turbulence intensity</i> pada $X = 100, 150$, dan 200 mm ; $AR = 1$; — tanpa silinder; \diamond G/B $= 0,5$; \blacklozenge $G/B = 1,0$27
Gambar 3.1	Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakkan <i>Inlet Disturbance Body</i>30
Gambar 3.2	Model uji penelitian30
Gambar 3.3	<i>Centrifugal Fan</i>32
Gambar 3.4	<i>Inlet Circular Disturbance Body</i>33
Gambar 3.5	Skema pemasangan <i>wall pressure tap</i> dan <i>pitot tube</i>34
Gambar 3.6	Lokasi perhitungan untuk profil kecepatan35
Gambar 3.7	<i>Inclined Manometer</i>36
Gambar 3.8	Skema validasi tekanan dinamis <i>pressure</i> <i>transducer 1" WC</i>41
Gambar 3.9	Hasil validasi tekanan dinamis <i>pressure transducer</i> <i>1" WC</i>42
Gambar 3.10	Skema validasi tekanan statis <i>pressure transducer</i> <i>3" WC</i>43
Gambar 3.11	Hasil validasi tekanan statis <i>pressure transducer 3"</i> <i>WC</i>44
Gambar 3.12	Lokasi perhitungan untuk <i>pressure drop</i>50
Gambar 3.13	Urutan Langkah Penelitian51
Gambar 4.1	<i>Pressure drop</i> pada <i>square duct</i> dengan <i>square</i> <i>elbow 90°</i> dengan variasi <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak <i>Inlet</i> <i>Disturbance Body</i> $0,1D_h - 0,5D_h$57
Gambar 4.2	<i>Pressure Drop Upstream Duct 90°</i> pada <i>Square</i> <i>Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i> dengan Variasi <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak <i>Inlet Disturbance Body</i> $l = 0,1D_h - l =$ $0,5D_h$58
Gambar 4.3	<i>Pressure Drop Elbow 90°</i> pada <i>Square Duct</i> dengan <i>Square Elbow 90°</i> dengan Variasi <i>Reynolds Number</i> $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak <i>Inlet</i> <i>Disturbance Body</i> $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$60

- Gambar 4.4 *Pressure Drop Downstream Duct* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* dengan Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak *Inlet Disturbance Body* $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$ 61
- Gambar 4.5 Koefisien *Losses Elbow 90°* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < ReD_h < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak *Inlet Disturbance Body* $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$ 63
- Gambar 4.6 *Pressure Coefficient* pada *Square Elbow 90°* Fungsi *Reynolds Number* dan Variasi (a) Tanpa *Inlet Disturbance Body* dan Variasi Jarak (b) $l = 0,1D_h$; (c) $l = 0,5D_h$ 67
- Gambar 4.7 *Pressure Coefficient* pada *Square Elbow 90°* dengan Variasi Tanpa *Inlet Disturbance Body*, Jarak $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ menggunakan *Reynolds Number* $8,74 \times 10^4$ 68
- Gambar 4.8 Grafik *velocity profile* (a) bidang horizontal sisi *upstream straight duct* (b) bidang vertikal sisi *upstream straight duct*..... 69
- Gambar 4.9 Grafik *velocity profile* bidang horizontal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* : (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 13; (h) 14..... 71
- Gambar 4.10 Grafik *velocity profile* bidang vertikal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* : (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 13; (h) 14..... 76
- Gambar 4.11 Grafik *turbulent intensity* pada posisi $x/D_h = 1$ setelah *outlet elbow 90°*..... 79
- Gambar 4.12 Grafik fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 1$ dan $z/D_h = 0,056$ pada (a) saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak l

	$= 0,1D_h$ dan (b) saluran tanpa menggunakan <i>inlet disturbance body</i>	80
Gambar 4.13	Grafik <i>velocity profile</i> bidang horizontal pada posisi $x/D_h = 1$ setelah <i>outlet elbow 90°</i>	83
Gambar 4.14	<i>Pressure Coefficient</i> pada <i>Square Elbow 90°</i> antara hasil eksperimen dan hasil penelitian terdahulu oleh Rup dan Sarna	84

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Peralatan Penelitian	52
Tabel 3.2 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	54

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aliran fluida merupakan salah satu fenomena yang dapat ditemui dalam kehidupan sehari-hari. Aliran air di sungai, aliran gas pada turbin hingga aliran darah pada pembuluh darah merupakan beberapa contoh dari fenomena aliran fluida. Melihat cakupan yang sangat luas dari fenomena aliran fluida tersebut, potensi untuk diadakannya penelitian terhadap fenomena ini juga sangat besar. Berbagai fenomena aliran fluida banyak ditemukan dalam industri yang sering kita jumpai, seperti pada instalasi pembangkit listrik, instalasi pengolahan minyak, instalasi transportasi air, dan instalasi pengkondisian udara (*Air Handling Unit*) pada gedung-gedung ataupun *mall* pada perkotaan. Menurut **Shi-Ming Deng dan Burnet (2000)**, penggunaan konsumsi energi paling besar didapati pada penggunaan daya untuk *air-conditioning* jika dibandingkan dengan penggunaan *lighting*, *lift escalators*, dan konsumsi daya listrik yang lain yaitu mencapai persentase penggunaan sebesar 32%. Penggunaan daya listrik untuk instalasi *air conditioning*, dalam hal ini adalah untuk *HVAC* (*Heat Ventilation Air Conditioning*) pada sehari-hari membutuhkan sedikitnya 600 kWh pada jam produktif orang bekerja. Hal tersebut merupakan penggunaan daya yang cukup tinggi jika dibandingkan untuk kepentingan yang lain. Instalasi-instalasi saluran fluida tersebut tidak hanya menggunakan sistem perpipaan dengan pipa lurus, melainkan dapat juga menggunakan pembelokan aliran, penggabungan aliran, ataupun percabangan aliran. Hal tersebut sering kita sebut dengan istilah *fitting* perpipaan. Salah satu penggunaan *fitting* perpipaan adalah dengan menggunakan *elbow* 90°.

Instalasi saluran fluida dengan menggunakan *elbow* 90° bertujuan untuk membelokkan aliran fluida sehingga instalasi

dapat terpasang sesuai dengan kebutuhan. Pemasangan *fitting* perpipaan ini akan membuat aliran di dalam *elbow* mengalami *pressure drop* yang lebih besar daripada aliran di dalam pipa lurus dengan panjang ekuivalen yang sama. Hal tersebut terjadi karena adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow* yang terjadi setelah melewati aksesoris tersebut. Separasi terjadi akibat ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure*. Sedangkan terbentuknya *secondary flow* terjadi akibat adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner* dan *outer wall* dan akibat adanya interaksi *boundary layer* pada *endwall flow*. Kerugian-kerugian yang terjadi pada aliran baik kerugian gesekan (*friction loss*) dan kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan *secondary flow* tersebut mengakibatkan terjadi fenomena aliran yang baru yaitu, terbentuknya *vortex* yang dapat mengurangi energi aliran sebagai akibat dari *separation loss* dan terjadinya penyumbatan aliran (*blockage effect*) serta mengurangi *effective flow area* sebagai akibat adanya *secondary flow* pada *cross section area*.

Salah satu usaha untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi di dalam *elbow* 90° adalah menambahkan sebuah bodi pengganggu silinder (*Inlet Disturbance Body*) sebelum *inlet elbow*. Penambahan *Inlet Disturbance Body* sebelum *inlet elbow* ini bertujuan untuk menunda *separation point* dan membuat aliran terjadi turbulensi. Semakin turbulen suatu aliran maka akan memiliki momentum yang lebih besar sehingga dapat mengurangi gaya hambat (*drag force*) pada suatu konfigurasi lingkaran silindris dan juga menambah kemampuan untuk melawan *adverse pressure*. Selain itu, dengan berkurangnya *drag force*, akan terjadi penurunan pada *minor head losses* sehingga nilai *pressure drop* yang terjadi juga akan semakin mengecil. **Choi & Lee (2010)** melakukan penelitian secara eksperimen tentang pengaruh sebuah silinder yang diletakkan dekat dinding plat datar. Eksperimen ini meninjau karakteristik aliran pada daerah sekitar silinder yang

diletakkan dekat dinding tersebut dengan memvariasikan rasio *gap* (G/B) antara silinder dengan plat. Silinder yang digunakan dalam eksperimen ini adalah silinder sirkular dan *elips*, serta berurutan mempunyai rasio *axis* $AR = 1$ dan 2 . Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa pada silinder *elips vortex* terjadi di daerah mendekati *wake* ketika rasio *gap* lebih besar dari *critical value*, yaitu $G/B = 0,4$ dimana seiring menurunnya rasio *gap*, frekuensi *vortex* juga tiba-tiba mengalami penurunan, lalu seiring dengan bertambahnya rasio *gap*, *drag coefficient* pada silinder *elips* juga meningkat, namun tingkat penambahannya lebih kecil daripada yang terjadi pada silinder sirkular pada rasio *gap* yang kecil, yaitu kurang dari $G/B = 0,5$. Dari eksperimen juga didapat daerah *wake* yang terbentuk di belakang silinder *elips* dan intensitas turbulensinya lebih kecil daripada pada silinder sirkular.

Rup dan Sarna (2011) melakukan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$. Hasil yang diharapkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*. Kemudian didapatkan bahwa hasil simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi $\phi = 30^\circ$ dan 60° serta perbedaan profil kecepatan yang cukup signifikan pada lokasi $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1034\ 775$). Selain itu, didapatkan koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$)

Eduard (2016) melakukan penelitian secara eksperimen aliran fluida pada *square duct* dan *square elbow 90°* yang melalui suatu bodi pengganggu berupa *damper*. Pada eksperimen ini dilakukan variasi pada sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° . Penelitian ini menggunakan Re_{Dh} $7,88 \times 10^4$ untuk profil kecepatan dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° dan 30° . *Pressure drop*, koefisien *losses elbow 90°* dan koefisien *losses damper* menggunakan variasi Re_{Dh} $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° . Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa proses *recovery* aliran dipengaruhi oleh sudut bukaan *damper*. Sudut bukaan *damper* 30° terjadi percepatan aliran pada daerah dekat dinding yang berakibat bertambahnya momentum aliran sehingga mempercepat proses *recovery* aliran dan aliran sekunder pada daerah dekat dinding dapat teratasi. Proses *recovery* sudut bukaan *damper* 30° terjadi pada $16D_h$ dari *outlet elbow 90°*. Hal ini lebih cepat jika dibandingkan saluran tanpa *damper*, sudut bukaan *damper* 0° , 10° dan 20° . Penempatan *damper* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* dan koefisien *losses damper* semakin tinggi dengan semakin meningkatnya *Reynolds number* pada setiap sudut bukaan *damper*.

1.2 Rumusan Masalah

Pada latar belakang masalah di atas, telah dijelaskan beberapa penyebab terjadinya *pressure drop* aliran di dalam *elbow 90°*, diantaranya disebabkan karena adanya *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow*. Adanya intensitas turbulensi yang cukup kuat dari *shear layer* (aliran yang terseparasi) pada *Inlet Disturbance Body* (IDB) diharapkan mampu memberikan agitasi pada *boundary layer* aliran yang melintasi dinding saluran yang memiliki kelengkungan, yaitu dengan melawan *adverse pressure* dan *wall shear stress* serta

mampu menambah momentum aliran untuk mengurangi *blockage area* pada sisi *inner wall*.

Oleh karena itu, dilakukan penelitian mengenai fenomena aliran pada *square duct* setelah melewati *elbow 90°* dan juga melewati suatu body pengganggu yaitu *Inlet Disturbance Body* (IDB) yang divariasikan terhadap jarak $0,1Dh$ sampai $0,5Dh$ pada *inner upstream duct*.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini terfokus dan tidak melebar dari tujuan awal. Batasan masalah tersebut adalah sebagai berikut :

1. Fluida kerja adalah udara dengan profil kecepatan udara *uniform* pada sisi *inlet*, sifat *incompressible*, *viscous* dan *steady*.
2. Temperatur fluida yang mengalir melalui saluran udara diasumsikan konstan.
3. Perpindahan panas akibat gesekan antara udara dengan dinding saluran dapat diabaikan.
4. Kekasaran dinding diabaikan.
5. Aliran yang melintasi saluran udara termasuk dalam *region* aliran turbulen.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan umum dalam penelitian ini yaitu guna mengetahui pengaruh interaksi aliran antara *Inlet Disturbance Body* (IDB) dan kelengkungan (*elbow 90°*) dinding saluran berpenampang bujur sangkar (*square duct*) yang divariasikan terhadap jarak peletakkan IDB yaitu $0,1Dh$ sampai $0,5Dh$ pada *inner upstream duct*, untuk mengetahui karakter aliran tersebut dilakukan studi eksperimental, adapun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui *pressure drop* antara *outlet duct* dan *inlet duct*.
2. Mengetahui koefisien *loss minor elbow 90°*.
3. Mengetahui nilai *Pressure Coefficient (C_p)* pada *elbow 90°*.
4. Mengetahui profil kecepatan pada *downstream duct* (posisi bidang horizontal dan vertikal).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut :

1. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* instalasi saluran udara antara *downstream duct* dan *upstream duct* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.
2. Memberikan penjelasan tentang *pressure drop* antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* serta koefisien *loss minor elbow 90°* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.
3. Memberikan gambaran tentang perbedaan nilai *Pressure Coefficient (C_p)* pada *elbow 90°* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.
4. Memberikan gambaran tentang perbedaan profil kecepatan aliran pada *downstream duct* yang melewati suatu saluran berpenampang *square* dan *elbow 90°* yang dipasang *Inlet Disturbance Body* pada sisi *inner upstream duct* dengan saluran yang tidak dipasang *Inlet Disturbance Body*.

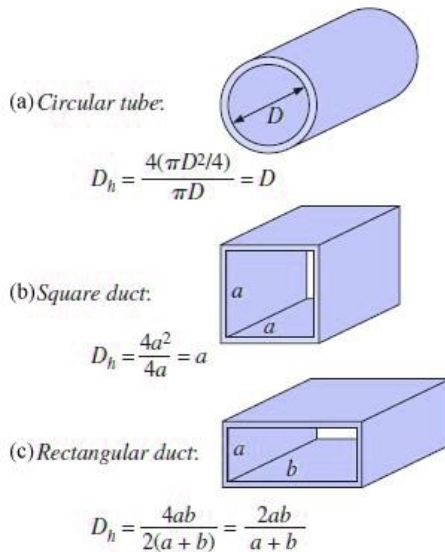
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang mendukung.

2.1 Sistem Saluran Udara (*Ducting*)

Secara umum *ducting* merupakan suatu benda yang berbentuk *square*/ kotak dan spiral atau *round* yang berfungsi sebagai media untuk mendistribusikan fluida yang bersifat udara dari suatu tempat ke tempat lain. *Ducting* juga bisa diartikan suatu benda kotak atau spiral yang berfungsi untuk mensirkulasikan sejumlah udara dari suatu ruangan dengan bantuan *fan unit/blower*, serta *AC central* dengan menggunakan sistem resirkulasi (*return air*).



Gambar 2.1 Macam – macam bentuk *ducting* (a) *Circular Tube*
(b) *Square Duct* (c) *Rectangular Duct*

Selain itu, terdapat berbagai macam fungsi *ducting* dalam penggunaannya dalam kehidupan sehari – hari, antara lain sebagai *supply* udara dingin ke ruang yang dikondisikan (*supply air*), *ducting* yang berfungsi sebagai *supply* dari udara luar (*fresh air*) dan ada pula *ducting* yang berfungsi untuk membuang udara dari dalam ke luar (*exhaust air*) secara fisik bentuk *ducting supply air* ini berinsulasi karena untuk mempertahankan udara dingin yang didistribusikan tidak terbuang, sedangkan untuk *ducting fresh air* dan *exhaust air* ini tidak menggunakan insulasi, lapisan dari insulasi ini antara lain : *Glasswool*, *Aluminium Foil*, *Spindle pin*/ pengikat/ tali/ *flinkote*. Sedangkan untuk lapisan *ducting* didekat unit *AC Indoor* (untuk sistem *AC Split*) atau Unit *Air Handling Unit* (sistem *central*) biasanya bagian dalamnya menggunakan *Glasswool* dan *glassclotch*, untuk meredam bunyi bising dari unit. Bahan yang digunakan untuk *ducting* itu sendiri bermacam-macam, ada yang terbuat dari bahan *PVC*, *mild steel*, BJLS (baja lapis seng), *PU (Polyurethane)*, untuk *ducting* yang terbuat dari bahan *PU* tidak perlu menggunakan lapisan luar karena lapisannya sudah tersedia dari pabrikan hanya untuk lapisan dalamnya saja yang terdapat didekat unit menggunakan *glassclotch*.

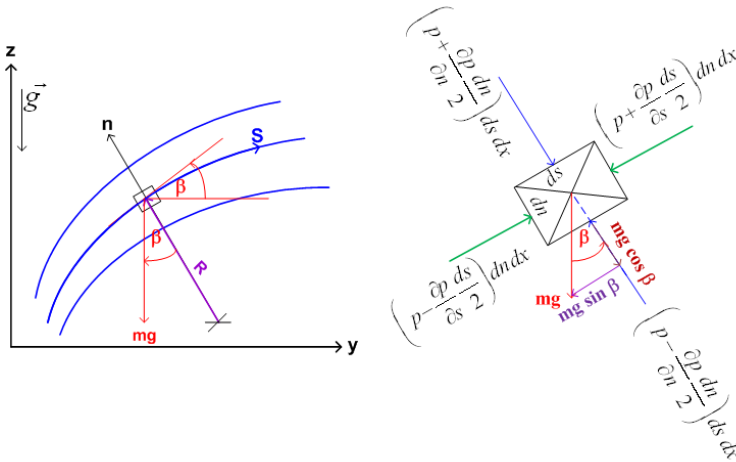
2.2 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Pada sebuah aliran tunak, aliran fluida di sepanjang *streamline* setiap partikel fluida yang berurutan melewati titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Dalam aliran tunak sebuah partikel fluida akan bergerak di sepanjang *streamline* dikarenakan untuk *steady flow*, *pathlines* dan *streamline* berlangsung dengan bersamaan. Dari persamaan Euler dibangun persamaan gerak yang dinyatakan dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*.

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$

Untuk memperjelas, dapat dilihat aliran pada bidang *yz* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Persamaan gerak

dituliskan dalam koordinat s (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat n (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari element adalah p .



Gambar 2.2 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Untuk *steady flow* dan mengabaikan *body forces*, persamaan Euler di sepanjang *streamline* ke arah s dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.2)$$

persamaan (2.2) tersebut menunjukkan hubungan antara kecepatan dengan tekanan, yang mana apabila terjadi penurunan kecepatan maka terjadi peningkatan tekanan, begitu pula sebaliknya. Hal ini sangat sesuai dengan hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa apabila suatu aliran ideal tanpa gesekan dijumlahkan antara komponen tekanan dan kecepatannya pada setiap titik, maka hasilnya adalah sama.

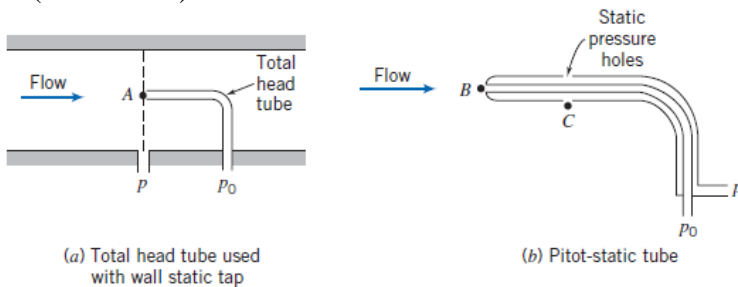
Untuk persamaan gerak ke arah n dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.3)$$

persamaan (2.3) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkungan *streamline*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan gaya yang bekerja pada partikel hanyalah gaya dari tekanan, medan tekanan menyebabkan percepatan sentripetal. Pada daerah *streamline* yang lurus atau radius kelengkungannya (R) tak terhingga maka tidak ada perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline* lurus.

2.3 Tekanan Statis, Tekanan Stagnasi dan Tekanan Dinamis

Tekanan yang diukur melalui suatu alat yang bergerak bersama aliran dengan kecepatan relatif alat ukur terhadap aliran dinamakan tekanan statis. Pengukuran tekanan statis biasanya menggunakan *wall pressure tap*, kecepatan aliran fluida pada permukaan dinding akan bernilai nol karena tidak ada fluida yang ideal (*non viscous*).



Gambar 2.3 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis (Fox dan Mc. Donald, 8th edition)

Tekanan stagnasi dapat didefinisikan sebagai tekanan yang diukur pada daerah dimana aliran fluida diperlambat hingga nol dengan proses perlambatan tanpa gesekan. Persamaan Bernoulli

dapat diterapkan pada aliran kompresibel untuk sepanjang suatu *streamline*, yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad (2.4)$$

Pengukuran tekanan stagnasi (P_o) dimana kecepatannya (U_o) adalah nol dan $z_o = z$ maka persamaan Bernoulli di atas menjadi :

$$P_o = P + \frac{U^2}{2} \rho \quad (2.5)$$

Tekanan dinamis merupakan selisih antara tekanan stagnasi dengan tekanan statis.

$$P_o - P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.6)$$

Dimana :

- P : Tekanan statis
- P_o : Tekanan stagnasi
- ρ : Densitas fluida
- U : Kecepatan aliran fluida
- U_o : Kecepatan stagnasi
- g : Percepatan gravitasi bumi
- z : Ketinggian

2.4 Bilangan *Reynolds*

Bilangan *Reynolds* adalah bilangan tidak berdimensi yang dapat mengklasifikasikan jenis aliran fluida. Pada umumnya jenis aliran fluida dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu laminar, transisi, dan turbulen. Dalam aplikasinya, aliran transisi jarang digunakan. Aliran fluida lebih sering diklasifikasikan menjadi 2 jenis aliran saja (laminar dan turbulen). Secara perumusan, bilangan *Reynolds* dapat ditulis sebagai berikut:

$$Re = \frac{\bar{V}.D}{\nu} \quad (2.7)$$

Dimana : V = Kecepatan fluida yang mengalir $\left(\frac{m}{s}\right)$
 D = Diameter dalam pipa (m)
 ν = Kekentalan kinematik fluida $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Untuk fluida yang melewati pipa yang tidak berbentuk *circular*, maka diameternya menggunakan diameter hidrolis (D_h), dimana D_h dihitung menggunakan rumus:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.8)$$

Dimana : D_h = Diameter hidrolis (m)
 A = Luas penampang (m^2)
 P = Keliling penampang (m)

2.5 Pressure Coefficient (C_p)

Dalam sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering kali dilakukan modifikasi parameter, $\Delta p / \rho V^2$, dengan memasukkan faktor $\frac{1}{2}$ untuk membuat *denominator* menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.9)$$

dimana Δp adalah tekanan lokal dikurangi dengan tekanan *freestream*, ρ dan V adalah properti dari aliran *freestream*. Rasio ini merupakan rasio antara gaya tekanan terhadap gaya inersia, dan rasio ini disebut dengan *Euler number*. *Euler number* sering disebut dengan *pressure coefficient*, C_p . Dalam pengujian suatu model, *pressure coefficient* secara tidak langsung digunakan untuk menyatakan besarnya *pressure drop*. *Pressure coefficient* pada *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis pada

dinding dengan tekanan statis referensi dibagi dengan dinamis yang diukur pada *inlet*.

2.6 *Head Loss*

Head loss merupakan suatu fenomena rugi– rugi aliran di dalam sistem pemipaan. Rugi–rugi aliran selalu terjadi pada sistem pemipaan dengan menggunakan berbagai macam fluida, seperti fluida cair dan gas. Pada umumnya, rugi aliran yang terbesar terjadi pada fluida cair, hal ini dikarenakan sifat molekulnya yang padat dibandingkan gas dan memiliki gesekan lebih besar terhadap media yang dilaluinya, terutama jika koefisien gesek media yang dilalui itu lebih besar, maka gesekan yang terjadi pun akan semakin besar. *Head losses* sangat merugikan dalam aliran fluida di dalam sistem pemipaan, karena *head losses* dapat menurunkan tingkat efisiensi aliran fluida.

Salah satu penyebab *head losses* adalah konstruksi desain dari sistem pemipaan tersebut. Jika konstruksi memiliki percabangan yang lebih banyak maka akan memperbesar rugi alirannya, selain itu aliran yang semula dalam keadaan laminar pada saat melalui pipa lurus yang koefisien geseknya besar akan berubah menjadi aliran turbulen. Kondisi aliran turbulen inilah yang dapat merugikan dalam sistem pemipaan tersebut, seperti akan menimbulkan getaran dan juga pengelupasan dinding pipa. Selain itu akibat yang paling mendasar dengan adanya rugi-rugi aliran (*head losses*) ialah dapat menyebabkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan aliran fluida yang berdampak meningkatnya penggunaan listrik pada mesin penggerak fluida seperti pompa. *Head losses* (rugi aliran) sering terjadi pada sistem pemipaan untuk seluruh perusahaan, industri rumah tangga, dan tempat lainnya yang menggunakan pipa sebagai distribusi aliran fluida.

2.6.1 *Head Loss Mayor*

Head losses mayor (rugi mayor) adalah besar nilai kehilangan energi yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida

dengan dinding pipa lurus yang mempunyai luas penampang yang tetap. Untuk menghitung *head loss mayor* dibedakan menurut jenis aliran fluidanya. *Head loss* yang terjadi pada aliran *fully developed* yang melewati pipa lurus horizontal dinyatakan sebagai kerugian tekanan aliran fluida *fully developed* melalui pipa penampang konstan.

a. Laminar

Untuk aliran laminar, berkembang penuh pada pipa horizontal, maka penurunan tekanan dapat dihitung secara analitis, yaitu:

$$\Delta p = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4} = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{D} \quad (2.10)$$

Substitusi dari persamaan , didapatkan:

$$h_l = 32 \frac{L}{D} \frac{\mu \bar{V}}{\rho D} = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2.11)$$

Dimana: h_{lm} = *head losses minor* (m)

Dan koefisien gesekan (f) untuk aliran laminar adalah:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12)$$

b. Turbulen

Head losses mayor untuk aliran turbulen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.13)$$

Dimana f (koefisien gesek) didapat dari hasil eksperimen dan dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds* (*Re*) dan kekasaran permukaan relatif $\left(\frac{l}{D} \right)$.

2.6.2 Head Loss Minor

Head losses minor (rugi minor) adalah besar nilai kehilangan energi aliran fluida di dalam pipa yang disebabkan oleh perubahan luas penampang jalan aliran, *entrance*, *fitting*, dan lain sebagainya. Rugi minor adalah rugi yang disebabkan gangguan lokal seperti pada perubahan penampang, adanya katub, belokan *elbow* dan sebagainya. Kerugian ini dapat diketahui dari persamaan:

$$h_{lm} = K \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.14)$$

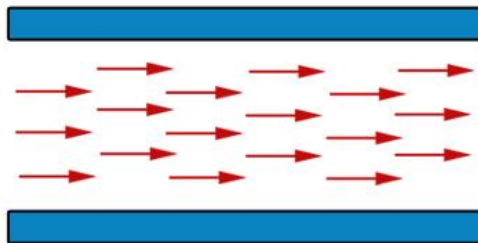
Dimana : h_{lm} = *head losses minor* (m)

2.7 Karakteristik Aliran Fluida di Dalam Pipa

Karakteristik struktur aliran internal (dalam pipa) sangat tergantung dari kecepatan rata-rata aliran dalam pipa, densitas, viskositas dan diameter pipa. Pada instalasi sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan *secondary flow*.

2.7.1 Aliran Laminar

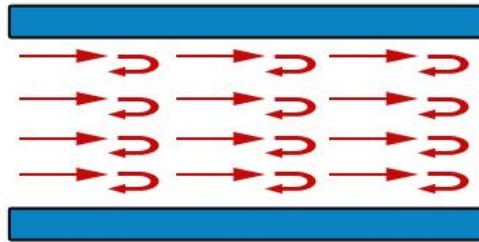
Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan–lapisan atau lamina–lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran laminar ini mempunyai nilai bilangan *Reynolds* kurang dari 2300 ($Re < 2300$).



Gambar 2.4 Aliran Laminar

2.7.2 Aliran Transisi

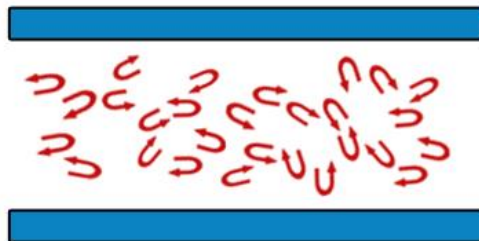
Aliran transisi merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Keadaan peralihan ini tergantung pada viskositas fluida, kecepatan dan lain-lain yang menyangkut geometri aliran dimana nilai bilangan Reynoldnya antara 2300 sampai dengan 4000 ($2300 < Re < 4000$).



Gambar 2.5 Aliran Transisi

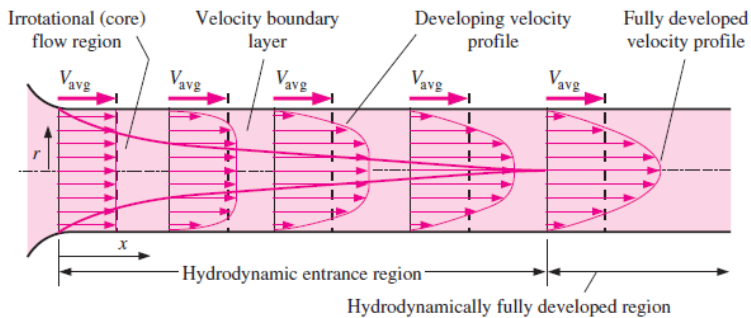
2.7.3 Aliran Turbulen

Aliran turbulen didefinisikan sebagai aliran yang dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dimana nilai bilangan Reynoldnya lebih besar dari 4000 ($Re > 4000$).



Gambar 2.6 Aliran Turbulen

2.7.4 Aliran Berkembang Penuh (*Fully Developed Flow*)



Gambar 2.7 Profil kecepatan untuk aliran di dalam saluran

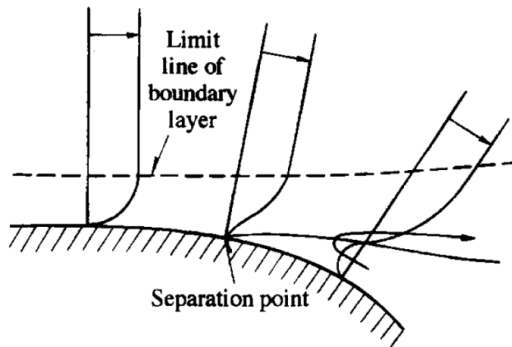
Fully Developed Flow merupakan suatu fenomena aliran dimana terjadinya *boundary layer* maksimum atau profil kecepatan yang tetap, tidak mengalami perubahan. Profil ini dipengaruhi oleh viskositas yang berakibat pada terjadinya gaya geser antara profil kecepatan.

Fenomena aliran seperti ini akan terjadi ketika aliran yang mengalir tidak mengalami gangguan, seperti *fitting*, instalasi, dan sebagainya. Setiap aliran baik aliran laminar maupun aliran turbulen mempunyai besaran yang berbeda dimana untuk aliran laminar bernilai konstan dari titik awal, hal tersebut terjadi karena pengaruh kecepatan fluida sehingga *fully developed flow* lebih cepat, berbeda dengan aliran turbulen dimana *fully developed flow* disebabkan oleh adanya aliran acak sehingga *fully developed flow* terjadi lebih panjang.

2.7.5 Separation Loss pada Elbow

Pada gambar 2.8 merupakan visualisasi terjadinya separasi aliran yang dapat menimbulkan terjadinya kerugian *pressure drop*. Hal tersebut disebabkan oleh adanya hubungan antara aliran dengan dinding *elbow* sehingga terjadi *friction loss* yang dapat mengurangi momentum dari aliran. Momentum aliran yang semakin kecil akan menambah ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient* sehingga juga akan mengurangi

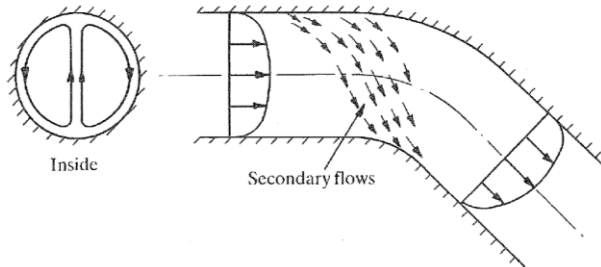
kecepatan aliran dan terbentuknya *vortex* di sekitar dinding *elbow*. Terbentuknya *vortex* tersebut akan berakibat pada mengecilnya luasan penampang aliran utama yang menyebabkan aliran mengalami percepatan dan menyebabkan terjadinya *pressure drop*.



Gambar 2.8 Terjadinya separasi aliran pada *boundary layer* (Nakayama & Boucher, 1998)

2.7.6 *Secondary Flow pada Elbow*

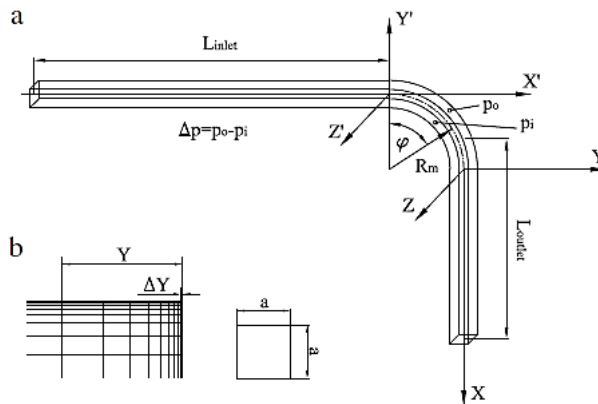
Secondary flow terjadi karena adanya perbedaan distribusi tekanan yang terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, tekanan statis akan semakin besar pada sisi *outer wall*. Oleh karena itu, aliran yang melewati *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama, sehingga terjadilah aliran sekunder (*secondary flow*). Pada *square elbow* memiliki ciri yang berbeda dibandingkan dengan *circular elbow*, yaitu terjadinya *secondary flow* pada sisi sudut. Pada *circular elbow*, tidak dijumpai fenomena *boundary layer* pada sisi samping dan bawah, namun pada *square elbow* hal tersebut dapat dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi samping dan bawah tersebut yang menyebabkan terjadinya *secondary flow*.



Gambar 2.9 Terjadinya *secondary flow* pada belokan (Miller, 1990)

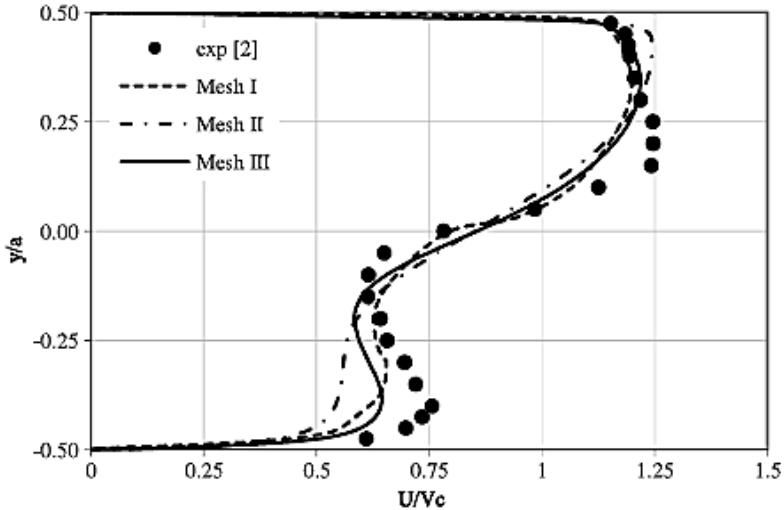
2.8 Penelitian Terdahulu

Rup dan Sarna (2011) melakukan penelitian yang dilakukan secara simulasi dan eksperimen untuk menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct*. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm seperti yang terlihat pada gambar 2.17. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$



Gambar 2.10 a) Posisi pengambilan data pada *domain* uji b) Mesh pada *Volume*. (Rup dan Sarna, 2011)

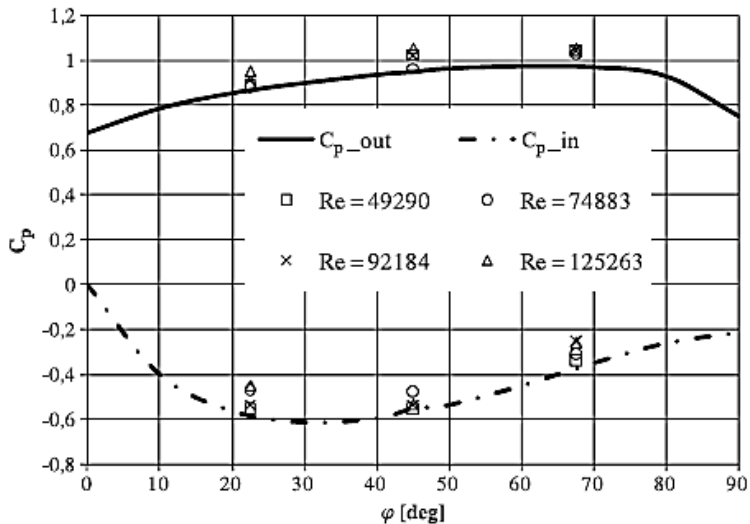
Hasil yang didapatkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*.



Gambar 2.11 Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ (Rup dan Sarna, 2011)

Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.11 yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi $x/D_h = 1.0$ dan $z/D_h = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($V_k = 1034\ 775$). Terjadi perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan sisi *outer* pada saluran setelah melewati *elbow*, hal itu dikarenakan adanya defisit momentum aliran pada sisi *inner* maupun *outer*, namun defisit momentum pada sisi *inner* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *outer*.

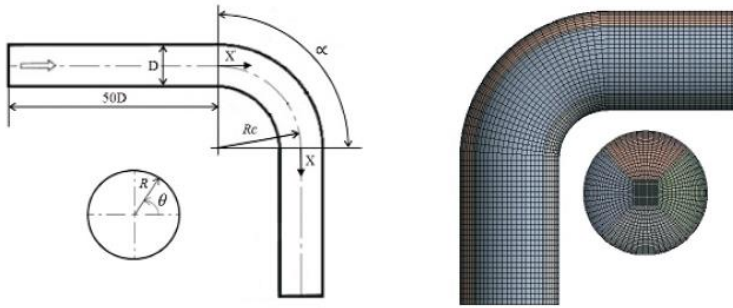
Gambar 2.12 memberikan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada *elbow* yang, dapat diamati bahwa koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien *losses* pada *elbow* tersebut.



Gambar 2.12 Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen.
(Rup dan Sarna, 2011)

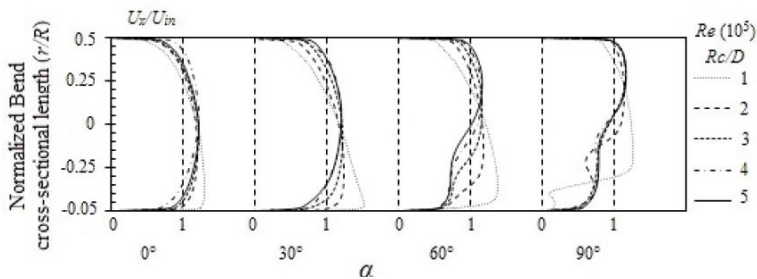
Dutta dan Nandi (2015) melakukan studi eksperimen dan numerik tentang pengaruh *Reynolds Number* dan *Curvature Ratio* pada aliran turbulen dalam pipa melengkung. Pada penelitian ini, aliran turbulen mengalir melalui saluran sirkular dengan pipa melengkung 90° (*elbow* 90°) menggunakan *curvature ratio* ($Rc/D = 1$ sampai 5) dengan memiliki diameter inner yang sama yaitu 0,01 m serta menggunakan panjang *inlet* 50D dan panjang *outlet* 20D, dimana Rc adalah radius kelengkungan dan D adalah

diameter pipa serta menggunakan bilangan Re dari 1×10^5 sampai 10×10^5 .



Gambar 2.13 Geometri pipa melengkung dan permodelan komputasinya. (Dutta dan Nandi, 2015)

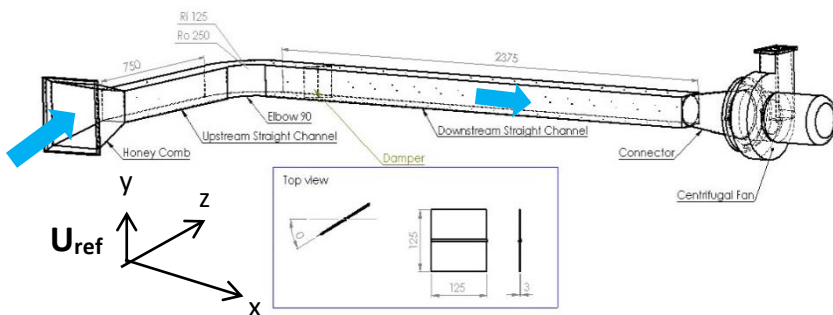
Dari penelitian ini didapatkan bahwa untuk nilai Re yang semakin tinggi, maka pengaruh kelengkungan akan menurun. Kecenderungan separasi aliran akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang rendah serta kemampuan melawan *unsteady* dan *complex flow* akan meningkat untuk lengkungan dengan *curvature ratio* yang tinggi.



Gambar 2.14 Velocity profile pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° dengan variasi *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$) (Dutta dan Nandi, 2015)

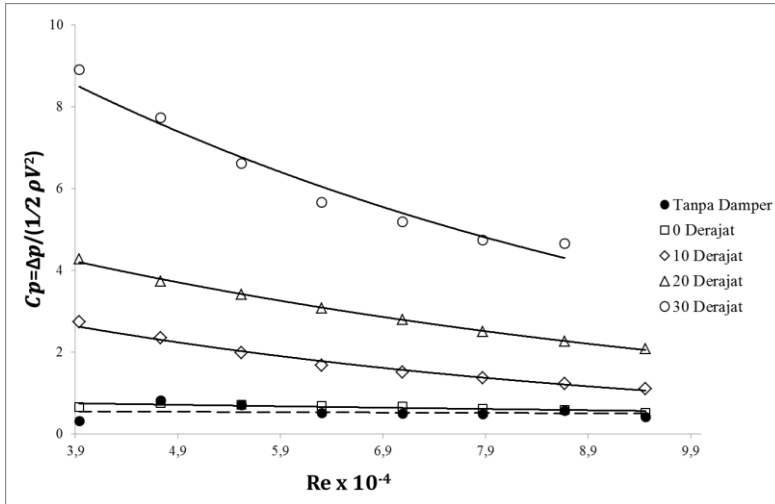
Gambar 2.14 adalah *velocity profile* untuk variasi 5 jenis *curvature ratio* ($R_c/D = 1 - 5$) dengan menggunakan *Reynolds Number* ($Re = 1 \times 10^5$). Pada outlet elbow ($\alpha = 90^\circ$), terdapat aliran balik sebagai akibat dari *adverse pressure gradient* pada outlet elbow dimana memiliki momentum aliran yang lebih rendah daripada momentum pada *freestream*, yang mana menurunkan kecepatan pada dekat dinding dan *boundary layer thickness*. Selain itu juga didapati bahwa percepatan yang lebih tinggi terjadi pada *curvature ratio* yang rendah.

Eduard (2016) melakukan penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square ducting* dengan variasi sudut bukaan damper 0° , 10° , 20° , dan 30° yang terletak pada daerah *downstream* setelah outlet elbow 90° $x/D_h = 2$ dan kecepatan sisi *upstream* pada $Re_{D_h} 7,88 \times 10^4$ untuk profil kecepatan pada penampang tegak lurus dengan damper (*horizontal cross section*) dan profil kecepatan pada penampang sejajar dengan damper (*vertikal cross section*) yang telah ditentukan. *Pressure drop*, koefisien losses elbow 90° dan koefisien losses damper dengan variasi *Reynolds number* $3,94 \times 10^4 < Re_{D_h} < 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 12 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa damper, sudut bukaan damper 0° , 10° , 20° dan 30° . Fenomena aliran fluida diambil data pada *downstream straight channel* dengan jarak antara *cross section* sepanjang D_h .



Gambar 2.15 Skema penelitian (Eduard, 2016)

Hasil studi eksperimen ini diperoleh bahwa proses *recovery* aliran dipengaruhi oleh sudut bukaan *damper*. Sudut bukaan *damper* 30° terjadi percepatan aliran pada daerah dekat dinding yang berakibat bertambahnya momentum aliran sehingga mempercepat proses *recovery* aliran dan aliran sekunder pada daerah dekat dinding dapat teratasi. Proses *recovery* sudut bukaan *damper* 30° terjadi pada 16D_h dari *outlet elbow* 90°. Hal ini lebih cepat jika dibandingkan saluran tanpa *damper*, sudut bukaan *damper* 0°, 10° dan 20°. Penempatan *damper* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* dan koefisien *losses damper* semakin tinggi dengan semakin meningkatnya *Reynolds number* pada setiap sudut bukaan *damper*.

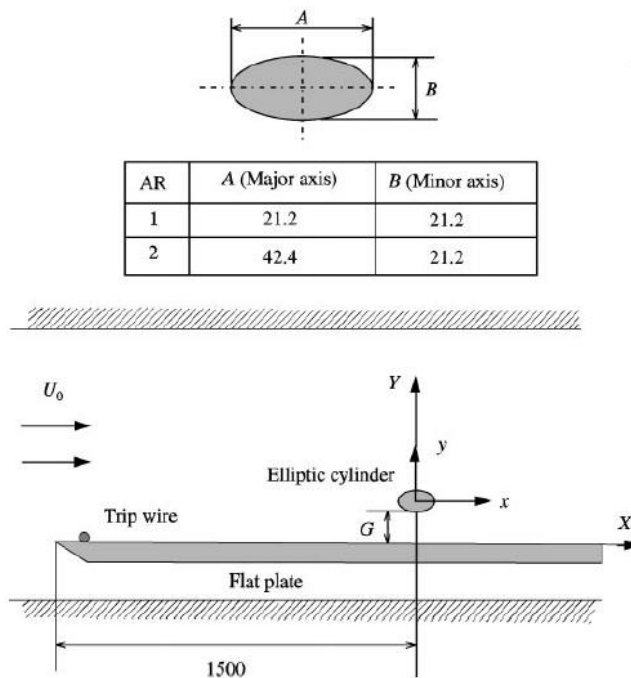


Gambar 2.16 *Pressure Coefficient* pada *square duct* dengan *square elbow* 90° dengan variasi *Reynolds number* $3,94 \times 10^4 < Re_{Dh} < 10^5$ dan variasi sudut bukaan *damper*. (Eduard, 2016)

Dari grafik gambar 2.16 dapat dilihat bahwa dengan adanya *damper* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *Pressure Coefficient* yang lebih rendah dengan semakin meningkatnya *Reynolds number* pada setiap sudut bukaan *damper*.

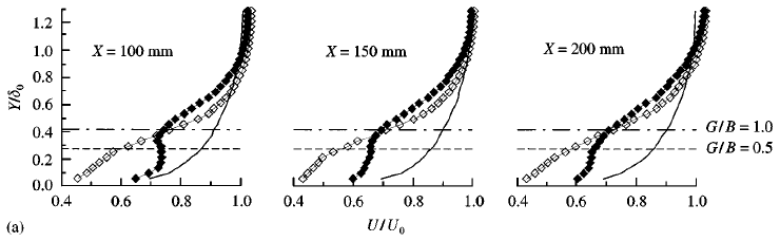
Pada setiap variasi bukaan damper, *Pressure Coefficient* mengalami penurunan secara signifikan dengan semakin bertambahnya *Reynolds number*. Hal ini dapat disebabkan oleh *pressure drop* yang semakin besar dan kecepatan udara masuk saluran juga semakin besar.

Choi & Lee (2010) melakukan penelitian secara eksperimen tentang pengaruh sebuah silinder yang diletakkan dekat dinding plat datar. Eksperimen ini meninjau karakteristik aliran pada daerah sekitar silinder yang diletakkan dekat dinding tersebut dengan memvariasikan rasio *gap* (G/B) antara silinder dengan plat. Silinder yang digunakan dalam eksperimen ini adalah silinder sirkular dan *elips*, serta berurutan mempunyai rasio *axis* $AR = 1$ dan 2 .



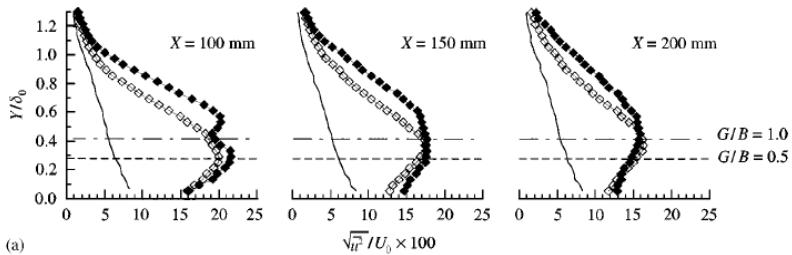
Gambar 2.17 Bentuk Geometri Silinder *Elips* dan Skema Penelitian. (Choi & Lee, 2010)

Eksperimen dilakukan pada sebuah *wind tunnel* dengan tinggi 0,6 m, lebar 0,72 m, dan panjang 6 m. Intensitas turbulensi *free-stream* pada bagian uji kurang dari 0,08% pada 10 m/s. Gambar 2.17 menunjukkan bentuk geometri silinder *elips* dan skema perlatan yang digunakan pada eksperimen ini. Sebuah plat datar dengan ketebalan 15 mm dan panjang 4,8 mm dipasang 100 mm diatas bagian permukaan dari bagian uji, dimana pada bagian depan plat datar tersebut berbentuk runcing membentuk sudut 30° . Silinder *elips* diletakkan pada 1,5 m dari bagian depan plat datar tersebut. Selain itu, juga ditambahkan sebuah kawat pengganggu pada plat datar tersebut dengan diameter 3,5 mm yang diletakkan sejauh 100 mm dari bagian ujung plat. *Boundary layer* terbentuk di atas bidang datar memiliki ketebalan 75 mm pada lokasi silinder. Selama eksperimen, kecepatan *free-stream* (U_o) telah ditetapkan pada 10 m/s dan menggunakan *Reynolds Number* sesuai dengan tinggi dari penampang silinder yang digunakan, yaitu $1,4 \times 10^4$.



Gambar 2.18 Mean streamwise velocity profiles pada $X = 100$, 150, dan 200 mm; $AR = 1$; — tanpa silinder; \diamond $G/B = 0,5$; \blacklozenge $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)

Gambar 2.18 menunjukkan *streamwise velocity profile* yang diukur pada $X = 100$, 150, dan 200 mm, serta *velocity profile* tanpa silinder. Dari situ, didapati bahwa pada silinder *elips* vortex terjadi di daerah mendekati *wake* ketika rasio *gap* lebih besar dari *critical value*, yaitu $G/B = 0,4$ dimana seiring menurunnya rasio *gap*, frekuensi *vortex* juga tiba-tiba mengalami penurunan.



(a)

Gambar 2.19 Streamwise turbulence intensity pada $X = 100$, 150, dan 200 mm; $AR = 1$; — tanpa silinder; —◇— $G/B = 0,5$; —◆— $G/B = 1,0$ (Choi & Lee, 2010)

Gambar 2.19 menunjukkan intensitas turbulensi pada daerah wake silinder sirkular semakin meningkat jika dibandingkan dengan plat datar tanpa silinder sirkular. Semakin menjauhi daerah wake silinder sirkular, intensitas turbulensi semakin berkurang. Intensitas turbulensi yang ditimbulkan oleh silinder sirkular dengan $G/B = 1,0$ lebih kuat jika dibandingkan dengan $G/B = 0,5$.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

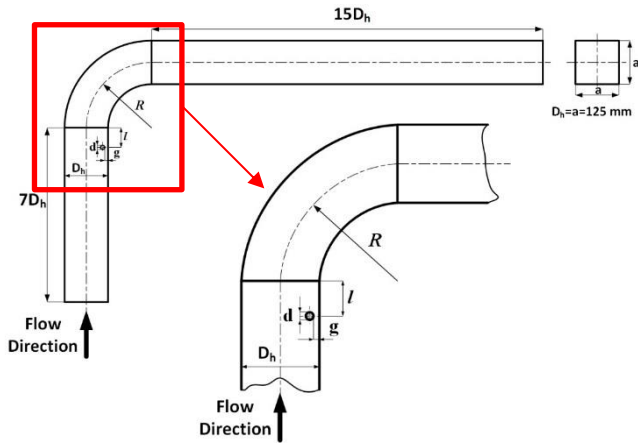
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dibahas metode penelitian yang digunakan, yaitu metode penelitian secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran dalam *square duct* dan *square elbow 90°* dengan variasi jarak peletakan *Inlet Disturbance Body* yang terletak pada daerah *inner upstream* sebelum *inlet elbow 90°*, $l/D_h = 0,1 - 0,5$; gap konstan $g/D = 0,2$; dan $R/D_h = 1,5$. Studi eksperimen ini menggunakan sebuah pengganggu (*Inlet Disturbance Body*) berbentuk silinder dengan tinggi 125 mm dan berdiameter 12,5. Untuk eksperimen ini digunakan beberapa klasifikasi pengambilan data berdasarkan variasi *Reynolds Number* atau variasi kecepatan, yaitu sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan nilai *pressure drop* dan koefisien *loss minor elbow 90°* digunakan *Reynolds Number* sebesar $3,97 \times 10^4$ sampai $13,5 \times 10^4$ atau kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s.
2. Untuk mendapatkan nilai *Pressure Coefficient* pada *elbow 90°* digunakan *Reynolds Number* sebesar $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $13,5 \times 10^4$ atau kecepatan 5 m/s, 11 m/s, dan 17 m/s.
3. Untuk mendapatkan profil kecepatan dan intensitas turbulensi digunakan *Reynolds Number* sebesar $8,74 \times 10^4$ atau kecepatan 11 m/s.

3.1 Skema Penelitian

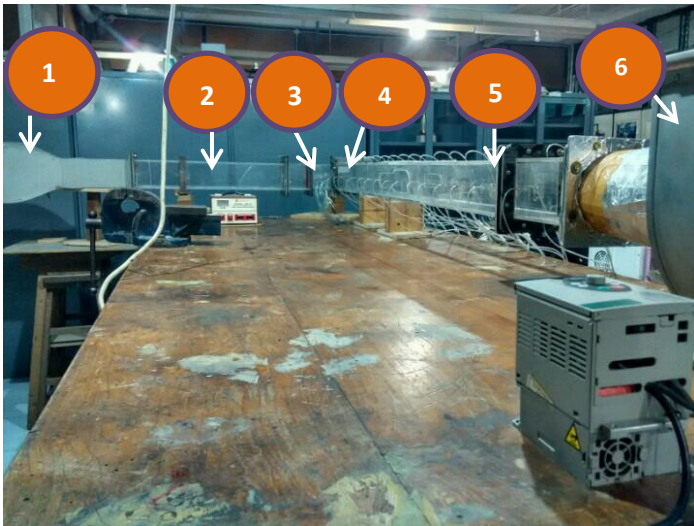
Instalasi penelitian berupa benda uji (*test section*) dan peralatan pendukung seperti *honey comb*, *square duct*, *square elbow 90°*, *centrifugal fan* dan *connector*. *Single inlet disturbance body* dipasang pada *inner upstream straight duct* dengan jarak $l = 0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ sebelum *inlet elbow 90°*. Skema instalasi penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian dan gambar detail dari peletakkan *Inlet Disturbance Body*

3.1 Peralatan Pendukung

3.2.1 Square Ducting



Gambar 3.2 Model uji penelitian

- Keterangan :
1. *Nozzle*
 2. *Upstream Straight Duct*
 3. *Inlet Disturbance Body*
 4. *Square Elbow 90°*
 5. *Downstream Straight Duct*
 6. *Centrifugal Fan*

Penelitian menggunakan *square ducting* dan *square elbow 90°* ini dimaksudkan untuk dapat menguji benda dalam skala model. Hal ini disebabkan pengukuran dengan skala sebenarnya cukup sulit dan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Oleh sebab itu, dibuatlah *square ducting* dan *square elbow 90°* dengan pembuatan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasilnya cukup akurat dan memadai.

Square ducting yang digunakan dalam percobaan ini adalah jenis *open circuit*, dimana udara yang dialirkan dalam *ducting* langsung bebas dilepas ke udara bebas setelah melalui *work section*.

Spesifikasi *Square Ducting* :

- Bentuk Penampang :
Square ducting & square elbow 90°
- Bahan :
Akrilik
- Tebal :
8 mm
- L_m (panjang total garis tengah *streamline elbow 90°*) :
2975 mm
- l_i (panjang total *inner* searah *streamline elbow 90°*) :
3170 mm
- l_o (panjang total *outer* searah *streamline elbow 90°*) :
3268 mm
- L_i (*upstream straight duct*) :
875 mm

- L_o (downstream straight duct) :
2000 mm
- R (centerline elbow 90° radius) :
188 mm
- r_i (inner radius) :
125 mm
- r_o (outer radius) :
250 mm
- D_h (diameter hidrolik) :
125 mm
- l (jarak cylinder disturbance terhadap inlet elbow 90°) :
12,5 mm; 25,0 mm; 37,5 mm; 50,0 mm; 62,5 mm
- g (gap cylinder disturbance terhadap dinding inner) :
2,5 mm

3.2.2. Centrifugal Fan

Pada penelitian ini digunakan 1 buah *centrifugal fan* (gambar 3.3) dengan spesifikasi sebagai berikut:



Gambar 3.3 *Centrifugal Fan*

- Merk : ElexMax Three-Phase
Asynchronous Motor
- Type : 71M4 – 4 B3
- No : 0221
- Voltage : 220 / 380 Voltage

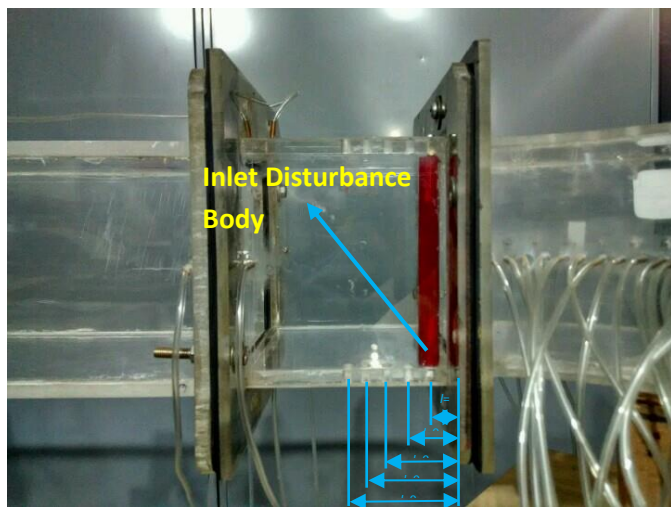
- Frekuensi : 50 Hz
- Daya : 0,75 KW
- Putaran : 1350 RPM
- Berat : 8,7 kg

3.2.3. *Honey Comb, Screen dan Nozzle*

Nozzle berfungsi untuk menambah kecepatan aliran sebelum memasuki *test suction*. Didalam *nozzle* terdapat *screen* dan *honeycomb* yang berfungsi untuk menjadikan aliran mendekati uniform dan mengurangi turbulensi aliran ketika memasuki instalasi *test suction*.

3.2.4. *Inlet Disturbance Body*

Dalam eksperimen ini, instalasi saluran udara dipasang bodi pengganggu berupa *inlet disturbance body* yang terletak pada jarak $l/D_h = 0,1$ sampai $0,5$ sebelum inlet



Gambar 3.4 *Inlet Circular Disturbance Body*

elbow 90°. Bentuk *inlet disturbance body* adalah silinder dengan panjang D_h dan memiliki diameter 12,5 mm.

3.2.5. Alat Ukur

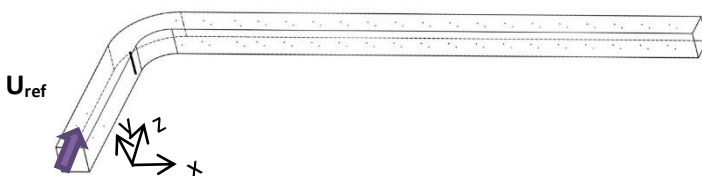
Pada spesimen ini dibutuhkan beberapa alat ukur untuk mendapatkan tekanan statis dan tekanan stagnasi, diantaranya adalah *wall-pressure tap*, *pitot static tube*, *tranducer* dan *manometer inclined*.

1. *Wall-pressure tap*

Wall-pressure tap yaitu lubang–lubang kecil berdiameter 1 mm yang terhubung pada manometer atau tranducer tekanan serta dipasang sepanjang kontur permukaan benda uji maupun saluran yang searah aliran dan tegak lurus terhadap permukaan.

2. *Pitot Tube*

Alat ini berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan statis sekaligus tekanan stagnasi aliran fluida yang terdapat pada saluran maupun yang terletak dibelakang benda uji. Pergeseran titik pengukuran secara horizontal pada setiap *cross section* yang sama dilakukan secara manual dengan skala pengukuran tertentu.



Gambar 3.5 Skema pemasangan *wall pressure tap* dan *pitot tube*

Posisi pemasangan *stagnation pitot tube* dan *wall pressure tap* pada benda uji secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.5. *Wall pressure tap* dipasang sepanjang *downstream straight duct* mulai dari *outlet elbow 90°* pada setiap dinding *ducting* yang disusun secara paralel pada

Ser.no. : X14500102

2. Untuk mengukur *pressure drop*

Model : PX653 - 03D5V

Range : $\pm 3''$ WC

Akurasi: 0.25 % FS (Fullscale)

Output : 1 – 5 VDC

Excitation : 12 – 36 VDC

4. *Inclined manometer (Manometer V) dan Mistar*

Manometer digunakan sebagai pembaca tekanan yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube*. *Manometer* yang digunakan mempunyai kemiringan sebesar 15° yang bertujuan untuk mempermudah pembacaan Δh . *Manometer* digunakan sebagai pembaca tekanan statis dan stagnasi yang terukur melalui *wall pressure tap* dan *pitot tube* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Inclined Manometer*

Spesifikasi manometer yang digunakan sebagai berikut:

- Skala minimum : 1 mm
- Fluida kerja : *Kerosene* ($SG_{\text{kerosene}} = 0,827$)
- Kemiringan : 15°

3.2 Analisa Dimensi Parameter – Parameter yang Dianalisa

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu eksperimen. Hubungan antara parameter yang saling mempengaruhi ditunjukkan dalam bentuk parameter-parameter tanpa dimensi. Metode analisa ini dikenal dengan *Buckingham Pi Theorem*. Dalam skema penelitian pada gambar 3.1. Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran sepanjang *downstream straight duct*.

- Δp : perbedaan tekanan statis lokal dan referensi (N/m²)
 ρ : massa jenis fluida (kg/m³)
 μ : viskositas absolut fluida (kg/(m.s))
 U_{ref} : kecepatan *freestream* di *inlet upstream straight duct* (m/s)
 u : kecepatan local (m/s)
 D_h : diameter hidrolik saluran (m)
 l : jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°*
 R : *centerline elbow 90° radius*
 g : *gap cylinder disturbance* dari dinding *inner*
 y : aliran searah sumbu koordinat y
 z : aliran searah sumbu koordinat z
 x : aliran searah sumbu koordinat x

3.3.1 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk *Pressure Drop pada Square Ducting*

Pressure drop pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga perbedaan tekanan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta p = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z,) \quad (3.1)$$

dimana ΔP adalah perbedaan tekanan (N/m²)

Menggunakan *Buckingham Pi-theorema* dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak dimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho U_{ref}^2}$: koefisien tekanan
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*
3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolik
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolik
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolik
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap cylinder disturbance* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolik
7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolik
8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolik
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolik

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \quad \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.2)$$

$$\bullet \quad \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah :

$$\frac{d}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h} \text{ sehingga } \frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h} \right) \quad (3.4)$$

dan untuk *pressure drop* tak berdimensi $\left(\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} \right)$ pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta p}{\rho U_{ref}^2} = f_2 \left(Re_{D_h}, \frac{l}{D_h} \right) \quad (3.5)$$

3.3.2 Analisa Grup Tak Berdimensi untuk kecepatan pada *Square Ducting*

Velocity profile pada *square ducting* diduga dipengaruhi oleh beberapa parameter, sehingga kecepatan dapat dituliskan sebagai fungsi parameter-parameter tersebut. Secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$u = f(\rho, \mu, U_{ref}, D_h, d, l, R, g, x, y, z,) \quad (3.6)$$

dimana u adalah kecepatan lokal (m/s)

Menggunakan Buckingham Pi-theorema dengan parameter ρ, U_{ref} dan D_h diperoleh 9 grup tak dimensi yaitu :

1. $\pi_1 = \frac{u}{U_{ref}}$: kecepatan tak berdimensi
2. $\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}$: bilangan *Reynolds*

3. $\pi_3 = \frac{d}{D_h}$: perbandingan diameter *disturbance body* dengan diameter hidrolis
4. $\pi_4 = \frac{l}{D_h}$: perbandingan jarak *cylinder disturbance* dari *inlet elbow 90°* dengan diameter hidrolis
5. $\pi_5 = \frac{R}{D_h}$: perbandingan *mean radius elbow 90°* dengan diameter hidrolis
6. $\pi_6 = \frac{g}{D_h}$: perbandingan *gap cylinder disturbance* dari dinding sisi *inner upstream* dengan diameter hidrolis
7. $\pi_7 = \frac{x}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu x* dengan diameter hidrolis
8. $\pi_8 = \frac{y}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu y* dengan diameter hidrolis
9. $\pi_9 = \frac{z}{D_h}$: perbandingan *arah aliran sumbu z* dengan diameter hidrolis

Hubungan antar grup tak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$\bullet \quad \Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (3.7)$$

$$\bullet \quad \frac{u}{U_{ref}} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{d}{D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{x}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}\right) \quad (3.8)$$

Pada penelitian ini yang menjadi variabel tetap adalah $\frac{d}{D_h}, \frac{R}{D_h}, \frac{g}{D_h}, \frac{y}{D_h}, \frac{z}{D_h}$ sehingga

$$\frac{u}{U_{ref}} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{ref} D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{x}{D_h}\right) \quad (3.9)$$

dan untuk kecepatan tak berdimensi $(\frac{u}{U_{ref}})$ pada *square ducting* adalah sebagai berikut :

$$\frac{u}{u_{ref}} = f_2 \left(Re_{Dh}, \frac{l}{D_h}, \frac{x}{D_h} \right) \quad (3.10)$$

Untuk menghitung profil kecepatan dengan menggunakan *Reynolds number* konstan yaitu $8,19 \times 10^4$.

3.3 Langkah – Langkah Validasi

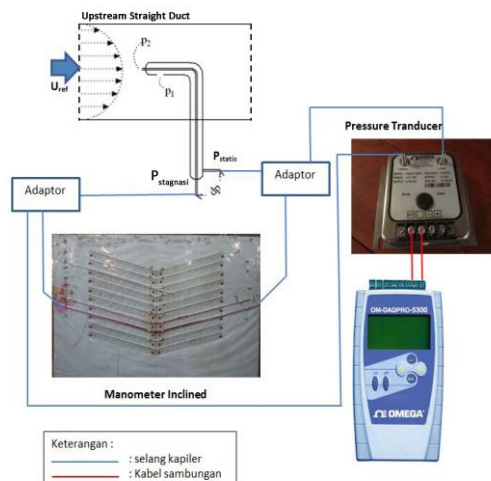
Ada beberapa langkah validasi yang perlu dilakukan sebelum pengambilan data, yaitu :

3.4.1 Alat yang digunakan

Peralatan yang dipergunakan pada proses kalibrasi :

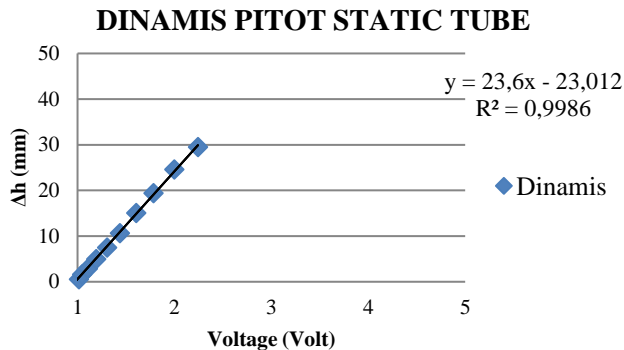
- *Inclined Manometer*
- *Pressure Tranduser 1" WC*
- *Pressure Tranduser 3" WC*
- *Data Aquisisi DAQ PRO 5300*
- *Pitot Static Tube*

3.4.2 Validasi Tekanan Dinamis



Gambar 3.8 Skema validasi tekanan dinamis *pressure tranduser 1" WC*

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *inlet disturbance body*.
2. *Pitot static tube* dipasang pada dinding saluran udara yang tersambung pada *manometer* dan *transducer*.
3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transducer 1" WC* untuk tekanan dinamik.
5. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aqisisi didapatkan *Voltage* (Volt).
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage* (Volt) sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.

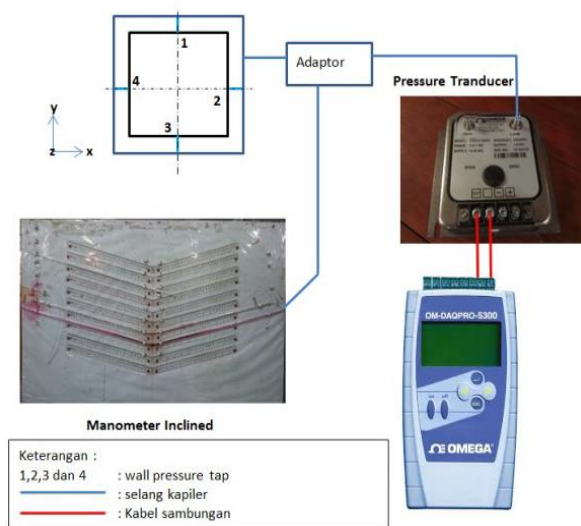


Gambar 3.9 Hasil validasi tekanan dinamis
pressure transducer 1" WC

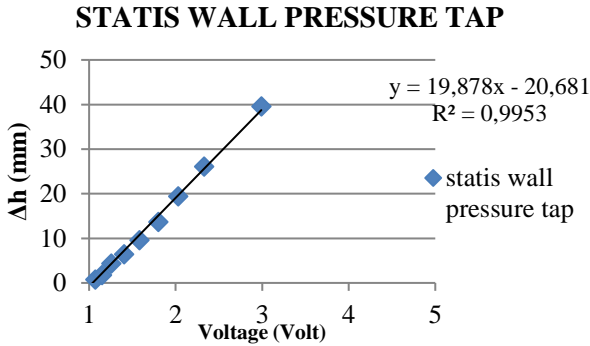
3.4.3 Validasi Tekanan Statis

1. Pemasangan instalasi untuk keadaan *free stream* tanpa dipasang *inlet disturbance body*.
2. *Wall pressure tap* pada *inlet upstream* dihubungkan pada *manometer* dan *transducer*.

3. Pengaturan *inverter* dari 0 – 50 Hz dengan interval 5 Hz.
4. Diambil data *manometer* dan *pressure transduser* 3" WC untuk tekanan statis dinding.
5. Dari *manometer* didapatkan Δh (mm) dan dari data aquisisi didapatkan *Voltage* (Volt).
6. Data-data tersebut dibuat grafik Δh *manometer* vs *voltage* (Volt) sehingga diketahui juga hubungan dengan sebuah formula.



Gambar 3.10 Skema validasi tekanan statis *pressure transduser* 3" WC



Gambar 3.11 Hasil validasi tekanan statis *pressure transduser 3" WC*

3.4 Prosedur Pengambilan Data

3.5.1 Pengambilan Data Kuantitatif

Parameter yang diukur pada penelitian ini meliputi tekanan stagnasi dan tekanan statis. Sebelum melakukan pengambilan data maka perlu dilakukan pengukuran suhu ruangan terlebih dahulu. Masing-masing pengukuran memiliki prosedur pengambilan data yang berbeda dan akan dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Prosedur pengukuran tekanan dinamis
 Prosedur pengukuran tekanan dinamis adalah sebagai berikut:
 - a) *Test section dipersiapkan.*
 - b) *Pitot tube* dipasang pada posisi yang ingin diukur.
 - c) *Pitot tube* dihubungkan dengan *pressure transducer* dengan menggunakan selang kapiler.
 - d) Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - e) *Voltage* dari *pressure transducer* pada tekanan stagnasi pada dicatat.
 - f) *Blower* dimatikan

- g) Langkah d sampai f diulangi sampai titik tekanan stagnasi terakhir yang telah ditentukan sebelumnya.
- 2) Prosedur pengukuran tekanan statis adalah sebagai berikut:
- Test section* dipersiapkan.
 - Wall pressure tap* dihubungkan ke *pressure transducer* dengan selang kapiler.
 - Frekuensi inverter diatur untuk mendapatkan putaran *blower* yang sesuai kebutuhan.
 - Data *voltage* dari *pressure transducer* dicatat.
 - Selang kapiler *pressure transducer* dilepas dari *wall pressure tap* pertama kemudian dihubungkan dengan selang kapiler untuk *wall pressure tap* pada titik *section* selanjutnya.
 - Langkah c) sampai e) diulangi sampai didapatkan data pada posisi *pressure tap* yang terakhir pada posisi $15D_h$ dari *inlet downstream straight duct*.

3.5.2 Pengolahan Data Kuantitatif

Pengolahan data dilakukan dengan membuat sebuah contoh perhitungan. Beberapa data awal yang diperlukan untuk melakukan proses perhitungan adalah :

- Diameter hidrolis (D_h) :
125 mm
- Panjang *downstream straight duct* :
2000 mm
- Panjang *inlet upstream* sampai *downstream*
 - Inner wall* (l_i) :
3170 mm
 - Outer wall* (l_o) :
3268 mm
- Sudut *inclined manometer* (θ) :
 15°

- *Specific Gravity kerosene* ($SG_{kerosene}$) : 0,827
- Percepatan Gravitasi (g) : 9,81 m/s²
- Temperatur ruangan dianggap konstan (T) : 28°C
- Massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{ud}) : 1,182 kg/m³
- Viskositas kinematis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ν) : $1,59 \times 10^{-5}$ m²/s
- Massa jenis air pada $T = 28^\circ\text{C}$ (ρ_{H2O}) : 996,4 kg/m³

1) Perhitungan untuk *Reynolds Number*

Pada eksperimen ini digunakan angka *Reynolds* yang didapat melalui persamaan 3.10 didapatkan kecepatan awal *centrifugal fan* diatur pada *Reynolds Number* $7,88 \times 10^4$.

$$Re_{Dh} = \frac{\rho_{ud} \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} = \frac{U_{ref} \cdot D_h}{\nu} \quad (3.11)$$

Dimana : ρ_{ud} : massa jenis udara pada 28°C (kg/m³)
 ν : viskositas kinematis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$ (m²/s)
 μ : viskositas absolut udara pada $T = 28^\circ\text{C}$
 U_{ref} : kecepatan freestream pada *inlet upstream straight duct* (m/s)
 D_h : diameter hidrolik ducting (m)
 Re_{Dh} : *Reynolds number*

Fan yang digunakan pada eksperimen ini adalah *centrifugal fan*. Untuk mendapatkan kecepatan awal (U_{ref}) sebesar 10 m/s dilakukan pengaturan frekuensi pada inverter secara manual. Dengan kalibrasi validasi tekanan dinamik pada saluran *upstream straight duct* melalui *inclined*

manometer untuk pengukuran nilai Δh . Nilai Δh diukur dari frekuensi 0 Hz sampai 50 Hz. Pengukuran kecepatan aliran masuk menggunakan persamaan 3.11 sebagai berikut:

$$P_{dinamis} = \rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \rho_{ud} \cdot (U_{ref})^2 &= SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot 2 \cdot \Delta h \sin 15^\circ \\ U_{ref}^2 &= \frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta h \sin 15^\circ}{\rho_{udara}} \\ U_{ref} &= \sqrt{\frac{4 \cdot SG_{kerosene} \cdot \rho_{H2O} \cdot g \cdot \Delta h \sin 15^\circ}{\rho_{udara}}} \quad (3.13) \end{aligned}$$

Dimana :	$P_{dinamis}$: ($P_{stagnasi} - P_{statis}$) tekanan dinamis diukur dengan <i>pitot tube</i> (N/m ²)
	$\rho_{kerosene}$: massa jenis <i>kerosene</i> pada 28°C (kg/m ³)
	ρ_{udara}	: massa jenis udara pada 28°C (kg/m ³)
	g	: percepatan gravitasi (m/s ²)
	Δh	: perbedaan fluida pada manometer (m)
	U_{ref}	: kecepatan freestream pada <i>inlet upstream</i> (m/s)
	$SG_{kerosene}$: <i>Specific Gravity kerosene</i> pada 28°C
	ρ_{H2O}	: massa jenis air pada 28°C (kg/m ³)

2) Perhitungan kecepatan lokal

Profil kecepatan diukur pada 15 test section sepanjang *downstream straight duct* dengan variasi jarak peletakkan *inlet disturbance body*. Perhitungan profil kecepatan pada setiap *section* sepanjang *downstream straight duct* ditulis sesuai persamaan 3.14 sebagai berikut:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_o - p_s)}{\rho_{udara}}} \quad (3.14)$$

Dimana :

- p_o : tekanan stagnasi yang diukur dengan *stagnation pressure tube*
- p_s : tekanan statis sejajar dengan *stagnation pressure tube*
- ρ_{ud} : massa jenis udara pada $T = 28^\circ\text{C}$
- $p_o - p_s$: tekanan dinamis

3) **Perhitungan Koefisien Losses elbow 90° ($K_{elbow 90^\circ}$)**

Eksperimen ini menggunakan *duct elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *inlet disturbance body* pada variasi jarak $0,1 D_h$ sampai $0,5 D_h$ dari *inlet elbow 90°* . Pemasangan *elbow 90°* akan mengakibatkan koefisien losses elbow 90° pada saluran. Koefisien losses elbow 90° adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecil *head loss minor* akibat pemasangan sebuah *elbow 90°* pada sebuah saluran udara. Pada eksperimen ini, koefisien losses elbow 90° didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°* .

$$P_{outlet elbow 90^\circ} - P_{inlet elbow 90^\circ} = K_{elbow 90^\circ} \frac{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}}{2} \quad (3.15)$$

$$K_{elbow 90^\circ} = \frac{(P_{outlet elbow 90^\circ} - P_{inlet elbow 90^\circ}) \times 2}{\bar{V}^2 \times \rho_{udara}} \quad (3.16)$$

Dimana : $P_{outlet elbow 90^\circ}$: Tekanan pada *outlet elbow 90°* (N/m^2)

$P_{inlet elbow 90^\circ}$:	Tekanan pada <i>inlet elbow 90°</i> (N/m ²)
\bar{V}^2	:	Kecepatan udara masuk pada upstream (m/s)
ρ_{udara}	:	massa jenis udara pada 28°C (kg/m ³)
$K_{elbow 90^\circ}$:	koefisien losses elbow 90°

Koefisien losses elbow 90° pada penelitian ini akan dilakukan dengan variasi *Reynolds number* $4,09 \times 10^4 < Re_{Dh} < 1,39 \times 10^5$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi jarak peletakan *inlet disturbance body* 0,1 sampai 0,5D_h.

4) Perhitungan *Pressure Drop* (ΔP)

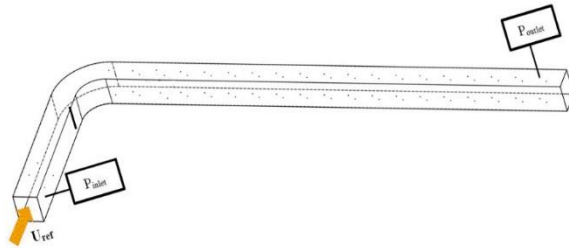
Pressure drop adalah selisih tekanan *inlet* pada *upstream straight duct* dan tekanan *outlet* pada *downstream straight duct* seperti pada gambar 3.12. Sisi *inner* dan *outer* mempunyai tekanan *inlet* dan *outlet* yang hampir sama. Perhitungan P_{inlet} dan P_{outlet} adalah sebagai berikut :

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (3.17)$$

$$\Delta P = (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (\rho_{kerosene} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet})$$

$$\Delta P = (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{inlet}) - (SG_{kerosene} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g \cdot \Delta h_{outlet}) \quad (3.18)$$

Dimana :	ΔP	:	<i>Pressure Drop</i> (N/m ²)
	P_{inlet}	:	Tekanan <i>inlet</i> pada <i>upstream straight duct</i> (N/m ²)
	P_{outlet}	:	Tekanan <i>outlet</i> pada <i>downstream</i> (N/m ²)



Gambar 3.12 Lokasi perhitungan untuk *pressure drop*

5) Perhitungan *Pressure Coefficient* (C_p)

Pada eksperimen ini, perhitungan *pressure coefficient* dilakukan pada *elbow 90°* untuk mengetahui *pressure drop* pada *elbow 90°*, perhitungan C_p dilakukan pada sisi *inner* dan *outer* pada *elbow 90°* tersebut.

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (3.19)$$

$$C_p = \frac{P_c - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (3.20)$$

Dimana : C_p : *Pressure Coefficient*
 P_c : Tekanan lokal (N/m²)
 P_∞ : Tekanan *freestream* (N/m²)
 ρ : Massa jenis udara (kg/m³)
 V : Kecepatan udara (m/s)

6) Perhitungan Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi merupakan bilangan untuk menentukan fluktuasi dari turbulensi dengan membandingkan *root mean square* dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (u_{avg}). Intensitas turbulensi dinyatakan dalam bentuk prosentase. Intensitas turbulensi dapat dinotasikan pada persamaan 2.18 sebagai berikut:

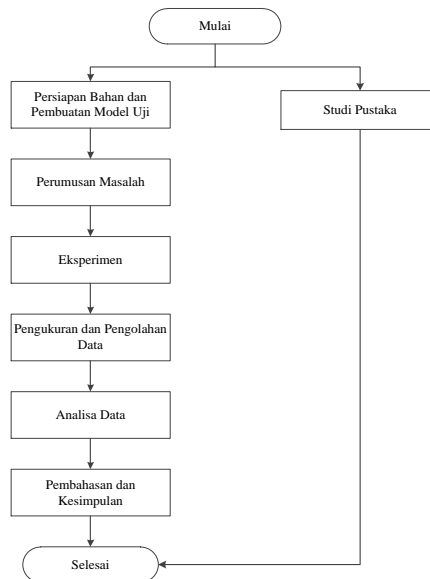
$$IT = \frac{u'}{u_{avg}} \times 100\% \quad (3.21)$$

$$u' = \sqrt{\frac{\sum(\bar{U} - U_n)^2}{n - 1}}$$

Dimana: IT : Intensitas turbulensi
 U_n : Kecepatan pada waktu tertentu (kecepatan lokal) (m/s)
 \bar{U} : Kecepatan rata-rata (m/s)
 u' : Standar deviasi fluktuasi kecepatan (m/s)

3.5 Urutan Langkah Penelitian




Gambar 3.13 merupakan urutan langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan.

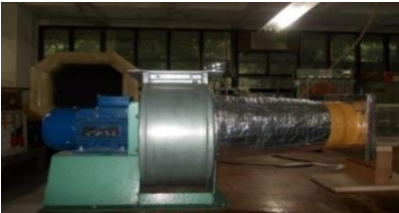





Gambar 3.13 Urutan Langkah Penelitian

3.7 Gambar Peralatan Penelitian

Tabel 3.2 Peralatan penelitian

No	Nama Alat	Gambar
1	DAQ PRO 5300 0-24 mA; 0-10V max Input : 8 Rate : 100/sample Samples : 1000	
2	Differential Pressure Transmitter Model : PX653-01D5V Model : PX653-03D5V Range : 1'' WC Range : 3'' WC Supply : 12-36 V Supply : 12-36 V Accuracy : Accuracy : per/spec per/spec Output : 1-5 VDC Output : 1-5 VDC Ser. No. : Ser. No. : X14500102 X11450118	
3	Inverter Model : ATV31HU15M2A U (V~) : input = 200/240 Ø1 output = 200/240 Ø3 F (Hz) : input = 50/60 output = 0.5/500 I (A) : input = 15.8 max output = 8.0	

4	Centrifugal Fan Fan : type : VDC/4 – 225 0.75 kW; 1400 RPM 220 V; 50 Hz Motor : type : 71M4 – 4 B3 220/380 V; 50 Hz; 0.75 kW	
5	Pitot Static Tube	
6	Inclined Manometer Cairan : Kerosene $SG = 0.827$ $Sudut (\alpha) = 15^\circ$	
7	Inlet Disturbance Body Dimensi : $l = 125 \text{ mm}$ $\varnothing = 12.5 \text{ mm}$	

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan data, grafik dan penjelasan dari hasil studi eksperimen. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub-bab meliputi profil kecepatan horizontal dan vertikal pada sisi *inlet upstream straight duct* dengan *inlet disturbance body* pada variasi jarak yang telah ditentukan, *pressure drop*, *Pressure Coefficient*, dan koefisien *losses elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number*.

Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa eksperimen profil kecepatan pada penampang horizontal dan vertikal dengan *inlet disturbance body* yang divariasikan jaraknya yaitu $l = 0,1D_h$ sampai $l = 0,5D_h$ dengan profil kecepatan model uji tanpa *inlet disturbance body* pada kecepatan 11 m/s, *pressure drop* pada *square duct* dengan *elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa *inlet disturbance body*, jarak peletakkan *inlet disturbance body* $0,1D_h$ sampai $0,5D_h$ dan koefisien *losses elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s), serta *Pressure Coefficient* pada *elbow 90°* dengan variasi jarak peletakkan *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ sampai $l = 0,5D_h$.

4.1.1 *Pressure drop pada Square Duct dengan Square Elbow 90°*

Eksperimen ini menggunakan duct dengan *elbow 90°* berpenampang *square*. Dengan penampang test section ini, terdapat kesempatan untuk mengamati berbagai macam karakter aliran fluida dan salah satunya adalah *pressure drop*. *Pressure drop* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan penurunan tekanan dari satu titik ke titik lain dalam suatu saluran. *Pressure drop* didapat karena adanya gaya gesek atau gaya

hambat terhadap fluida ketika mengalir melintasi saluran. Pada eksperimen ini, *pressure drop* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet upstream straight duct* dan *pressure tap outlet downstream straight duct* dengan panjang $l = 15D_h$ dari outlet elbow 90° .

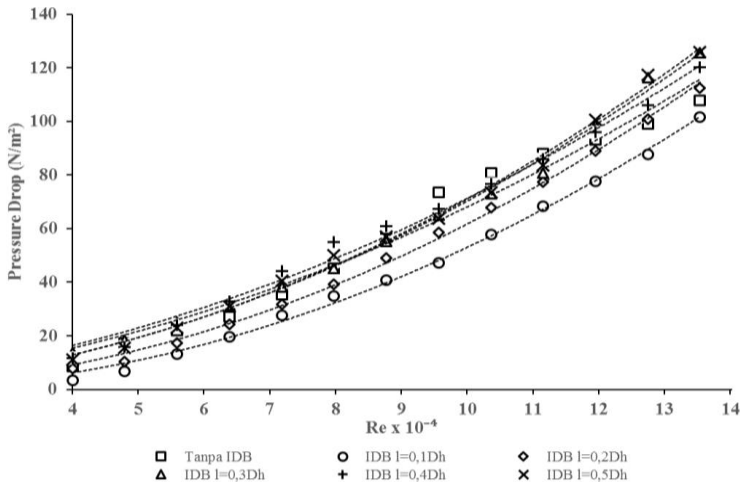
Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik *pressure drop* pada *square duct* dengan *square elbow 90°* . Grafik dari nilai *pressure drop* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s) dengan variasi tanpa *inlet disturbance body* dan jarak peletakan *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ sampai $l = 0,5D_h$ ditunjukkan pada gambar 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4.

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds Number* maka akan semakin meningkat pula *pressure drop* yang terjadi pada masing-masing jarak peletakan *inlet disturbance body*. Sehingga dapat dikatakan jika kecepatan dari suatu fluida meningkat, maka *pressure drop* akan meningkat pula. Hal ini dapat disebabkan oleh *headloss* yang semakin besar, sesuai dengan perumusan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\bar{V}^2}{2} \times \left(f \frac{L_{upstream}}{D_h} + f \frac{L_{downstream}}{D_h} + k_{elbow 90^\circ} \right) \quad (4.1)$$

Dengan adanya *inlet disturbance body* pada saluran, akan mengurangi *losses* pada elbow 90° dengan memanfaatkan adanya *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari *inlet disturbance body* yang memiliki intensitas turbulensi cukup kuat untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner* maupun *outer* dan mengurangi *blockage area* sehingga momentum aliran utama tidak berkurang terlalu banyak akibat adanya *losses* pada elbow 90° tersebut.

Selain itu, dari grafik gambar 4.1 dapat dilihat bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dan lebih

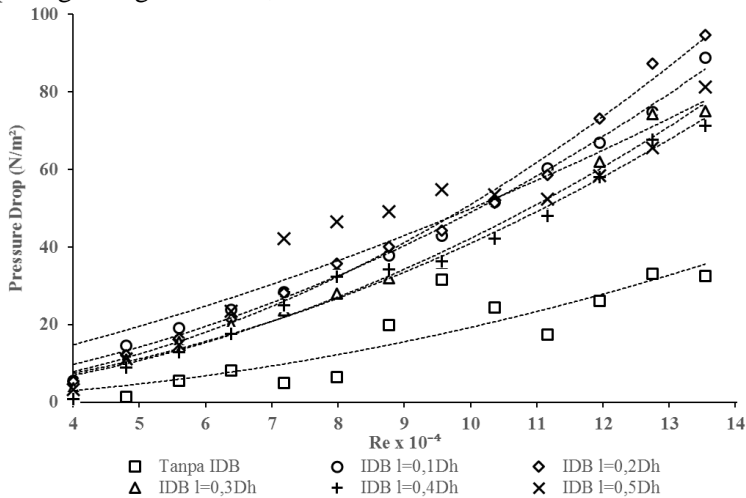


Gambar 4.1 Pressure Drop Duct 90° pada Square Duct dengan Square Elbow 90° dengan Variasi Reynolds Number $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak Inlet Disturbance Body $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$

tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan inlet disturbance body, dimana nilai pressure drop akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya Reynolds Number pada setiap variasi jarak inlet disturbance body. Pada jarak inlet disturbance body $l = 0,1D_h$ mempunyai Trendline grafik meningkat mulai dari Reynolds Number $3,97 \times 10^4$ sampai dengan Reynolds Number $13,5 \times 10^4$. Trendline grafik meningkat ini juga terjadi pada jarak $l = 0,2D_h$, $l = 0,3D_h$, $l = 0,4D_h$, dan $l = 0,5D_h$ mulai dari Reynolds Number $3,97 \times 10^4$ sampai dengan Reynolds Number $13,5 \times 10^4$. Hal ini dapat sesuai dengan perumusan 4.3, ketika kecepatan aliran yang melintasi saluran meningkat maka nilai pressure drop akan meningkat. Dari seluruh variasi jarak inlet disturbance body, dapat dilihat bahwa pada jarak inlet disturbance body $l = 0,1D_h$ memiliki pressure drop paling rendah pada setiap variasi Reynolds Number, sedangkan pada jarak inlet

disturbance body $l = 0,5D_h$ memiliki *pressure drop* paling tinggi pada setiap variasi *Reynolds Number*. Penempatan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk mereduksi *pressure drop* dengan rata – rata persentase penurunan *pressure drop duct* sebesar 17,68% terhadap *pressure drop duct* pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.

Gambar 4.2 merupakan gambar grafik yang menunjukkan *pressure drop* pada daerah *upstream duct*, yaitu antara *inlet duct* dan *inlet elbow* 90° . Dapat dilihat bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai *pressure drop* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynolds Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Berbeda dengan *pressure drop duct* seperti pada grafik gambar 4.1,

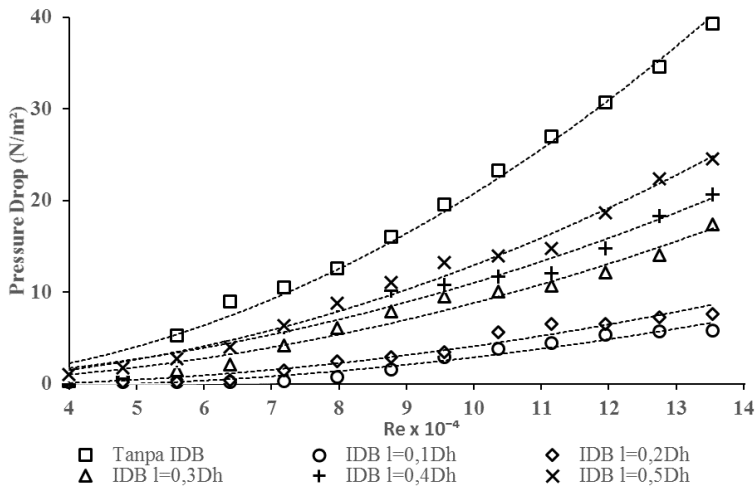


Gambar 4.2 *Pressure Drop Upstream Duct pada Square Duct dengan Square Elbow 90° dengan Variasi Reynolds Number $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak Inlet Disturbance Body $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$*

dengan penambahan *inlet disturbance body* pada daerah *upstream duct* justru memberikan hasil *pressure drop* yang lebih tinggi dibandingkan dengan saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Hal tersebut disebabkan karena pemasangan bodi pengganggu diletakkan hanya pada sisi *upstream duct*. Oleh karena itu, terjadi kenaikan *pressure drop* yang sangat signifikan. Dari seluruh variasi jarak *inlet disturbance body*, dapat dilihat bahwa pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* memiliki *pressure drop* paling rendah pada setiap variasi *Reynolds Number*, sedangkan pada jarak *inlet disturbance body* $l = 0,2D_h$ memiliki *pressure drop* paling tinggi pada setiap variasi *Reynolds Number*. Penempatan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,2D_h$ memiliki rata – rata persentase kenaikan *pressure drop upstream duct* sebesar 261,81% terhadap *pressure drop upstream duct* pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.

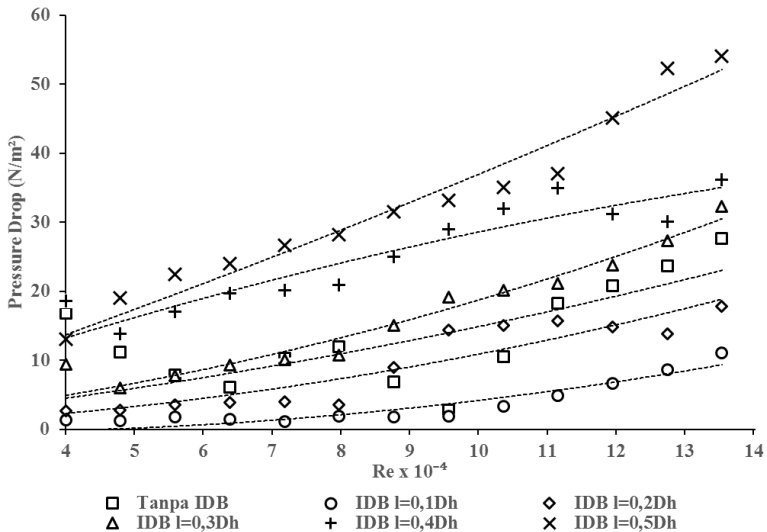
Sedangkan gambar 4.3 merupakan gambar grafik yang menunjukkan *pressure drop* pada *elbow 90°* yaitu antara *inlet elbow 90°* dan *outlet elbow 90°*. Dapat dilihat bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai *pressure drop* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynolds Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Berbeda dengan *pressure drop* pada daerah *upstream duct* seperti pada grafik gambar 4.2, dengan penambahan *inlet disturbance body* pada daerah *upstream duct* berhasil mereduksi *pressure drop* jika dibandingkan dengan saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Fenomena ini menjadi bukti bahwa penempatan *inlet disturbance body* yang dikombinasikan dengan kelengkungan pada *elbow 90°* mampu memberikan pengaruh dengan mereduksi *pressure drop* pada sepanjang *elbow 90°*. Hal itu disebabkan adanya intensitas turbulensi yang kuat dari *separated shear layer* pada *inlet disturbance body* yang

mengalami *re-attachment* pada *boundary layer* kelengkungan *elbow* 90° yang mampu untuk melawan *adverse pressure* dan mengurangi *blockage area*. Oleh karena itu, secara langsung juga akan memberikan pengaruh pada penurunan *pressure drop* pada *elbow* 90° . Dari seluruh variasi jarak *inlet disturbance body*, dapat dilihat bahwa pada jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ memiliki *pressure drop* paling rendah pada setiap variasi *Reynolds Number*, sedangkan pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* memiliki *pressure drop* paling tinggi pada setiap variasi *Reynolds Number*. Penempatan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ memiliki rata – rata persentase penurunan *pressure drop elbow* 90° sebesar 130,95% terhadap *pressure drop elbow* 90° pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.



Gambar 4.3 *Pressure Drop Elbow* 90° pada *Square Duct* dengan *Square Elbow* 90° dengan Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak *Inlet Disturbance Body* $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$

Kemudian pada gambar 4.4 merupakan gambar grafik yang menunjukkan *pressure drop* pada daerah *downstream duct* yaitu antara *outlet elbow 90°* dan *outlet duct*. Sama halnya dengan *pressure drop* pada *duct*, dapat dilihat bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai *pressure drop* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynolds Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*.



Gambar 4.4 *Pressure Drop Downstream Duct* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* dengan Variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan Variasi Jarak *Inlet Disturbance Body* $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$

Terlihat bahwa *pressure drop* pada saluran dengan jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,2D_h$ efektif untuk mereduksi *pressure drop* pada daerah *downstream*, namun terjadi peningkatan *pressure drop* pada variasi jarak $l = 0,3D_h - 0,5D_h$.

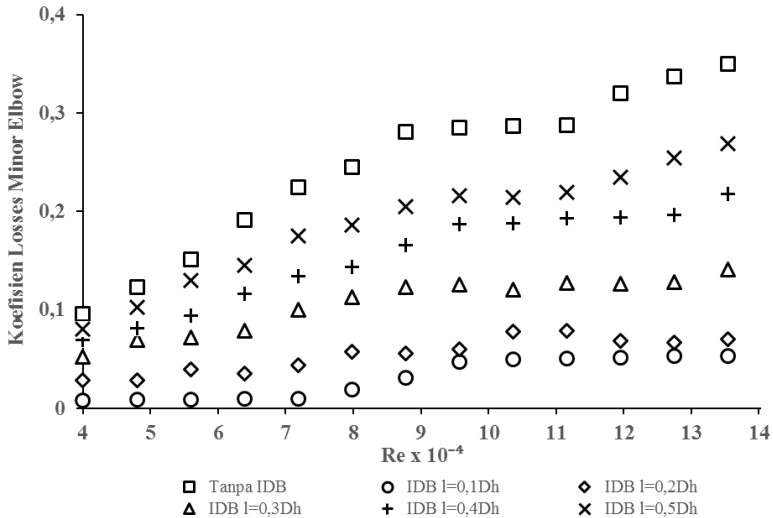
Hal itu disebabkan masih adanya pengaruh intensitas turbulensi yang kuat dari *separated shear layer* pada *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,2D_h$ pada daerah *downstream duct*. Oleh karena itu, secara langsung juga akan memberikan pengaruh pada penurunan *pressure drop* pada *downstream duct*. Dari seluruh variasi jarak *inlet disturbance body*, dapat dilihat bahwa pada jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ memiliki *pressure drop* paling rendah pada setiap variasi *Reynolds Number*, sedangkan pada jarak *inlet disturbance body* $l = 0,5D_h$ memiliki *pressure drop* paling tinggi pada setiap variasi *Reynolds Number*. Penempatan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ memiliki rata – rata persentase penurunan *pressure drop downstream duct* sebesar 72,94% terhadap *pressure drop downstream duct* pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.

4.2 Koefisien *Losses Elbow 90°* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°*

Eksperimen ini menggunakan *square duct* dengan *elbow 90°* berpenampang *square* dengan dipasang sebuah *inlet disturbance body* (bodi pengganggu) berbentuk silinder pada jarak $l = 0,1D_h$ sampai $l = 0,5D_h$ dari *inlet elbow 90°*. Pemasangan *inlet disturbance body* akan memberikan pengaruh pada nilai koefisien *losses elbow 90°*. Koefisien *losses elbow 90°* adalah nilai konstanta yang menentukan besar kecilnya *headloss minor elbow 90°* akibat pemasangan *elbow 90°* itu sendiri dan sebuah *inlet disturbance body*. Pada eksperimen ini, koefisien *losses elbow 90°* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap inlet* sebelum *elbow 90°* dan setelah *elbow 90°* yang terdapat pada *downstream straight duct*.

Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan karakteristik koefisien *losses elbow* pada *square duct* dengan *square elbow*. Grafik dari nilai koefisien *losses elbow* fungsi variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s sampai 17 m/s dengan kenaikan kecepatan 1 m/s)

dengan variasi tanpa *inlet disturbance body* dan jarak peletakan *inlet disturbance body* $l = 0,1 D_h$ sampai $l = 0,5D_h$ ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Koefisien *Losses Elbow 90°* pada *Square Duct* dengan *Square Elbow 90°* dengan variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4 < Re_{Dh} < 13,5 \times 10^4$ dan variasi jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$

Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *Reynolds number* maka akan semakin meningkat pula nilai koefisien losses elbow 90° yang terjadi pada masing-masing pada masing-masing jarak peletakan *inlet disturbance body*. Sehingga dapat dikatakan jika kecepatan dari suatu fluida meningkat, maka koefisien losses elbow 90° akan meningkat. Hal ini dapat disebabkan oleh *headloss minor* yang semakin besar, sesuai dengan perumusan sebagai berikut :

$$k_{elbow 90^\circ} = \frac{2\Delta P}{\rho \cdot \bar{V}^2} \quad (4.2)$$

Selain itu, dari gambar 4.5 juga dapat dilihat bahwa dengan adanya *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu menghasilkan nilai koefisien *losses elbow 90°* yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, dimana nilai koefisien *losses elbow 90°* akan meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya *Reynolds Number* pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body*. Pada jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1 D_h$ mempunyai *Trendline* grafik meningkat mulai dari *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynolds Number* $13,5 \times 10^4$. *Trendline* grafik meningkat ini juga terjadi pada jarak $l = 0,2 D_h$, $l = 0,3 D_h$, $l = 0,4 D_h$, dan $l = 0,5 D_h$ mulai dari *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$ sampai dengan *Reynolds Number* $13,5 \times 10^4$. Hal ini dapat sesuai dengan perumusan 4.7, yaitu ketika kecepatan aliran yang melintasi saluran meningkat maka nilai *pressure drop* akan meningkat. Oleh karena itu, dengan semakin meningkatnya *pressure drop* maka nilai koefisien *losses elbow 90°* akan semakin meningkat. Dari seluruh variasi jarak *inlet disturbance body*, dapat dilihat bahwa pada jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1 D_h$ memiliki nilai koefisien *losses elbow 90°* paling rendah pada setiap variasi *Reynolds Number*, sedangkan pada jarak variasi tanpa menggunakan *inlet disturbance body* memiliki nilai koefisien *losses elbow 90°* paling tinggi pada setiap variasi *Reynolds Number*. Penempatan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1 D_h$ merupakan jarak paling efektif untuk mereduksi koefisien *losses elbow 90°* dengan persentase sebesar 9,74% terhadap koefisien *losses elbow 90°* pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.

4.3 *Pressure Coefficient* pada *Square Elbow 90°*

Eksperimen ini menggunakan *duct* dengan *elbow 90°* berpenampang *square*. Dengan penampang *test section* ini, terdapat kesempatan untuk mengamati berbagai macam karakter aliran fluida dan salah satunya adalah *Pressure Coefficient*. *Pressure Coefficient* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan koefisien tekanan dari satu titik ke titik lain

dalam saluran. *Pressure Coefficient* didapat karena *pressure drop* akibat adanya gaya gesek atau gaya hambat terhadap fluida ketika mengalir melintasi saluran dan kecepatan udara yang masuk pada saluran. Pada eksperimen ini, *Pressure Coefficient* didapatkan dari data perbedaan tekanan dari *pressure tap freestream* dan *pressure tap outer wall* maupun *inner wall* yang terdapat pada sepanjang dinding melengkung dari *elbow 90°* yang dipasang masing – masing sebanyak 19 *pressure tap* dari 0° sampai 90° dengan selisih pemasangan antar *pressure tap* setiap kenaikan 5°.

Pada sub bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan *Pressure Coefficient inner wall* maupun *outer wall* pada *elbow 90°*. Grafik dari nilai *Pressure Coefficient elbow 90°* fungsi variasi jarak *inlet disturbance body* dengan menggunakan nilai *Reynolds Number* yang konstan yaitu $8,74 \times 10^4$ (kecepatan udara 11 m/s) ditunjukkan pada gambar 4.6. Kemudian grafik dari nilai *Pressure Coefficient elbow 90°* fungsi variasi *Reynolds Number* $3,97 \times 10^4$, $8,74 \times 10^4$, dan $13,5 \times 10^4$ (kecepatan udara 5 m/s, 11 m/s, dan 17 m/s) dengan variasi tanpa *inlet disturbance body* dan jarak peletakan *inlet disturbance body* $l = 0,1 D_h$ dan $l = 0,5 D_h$ ditunjukkan pada gambar 4.4.

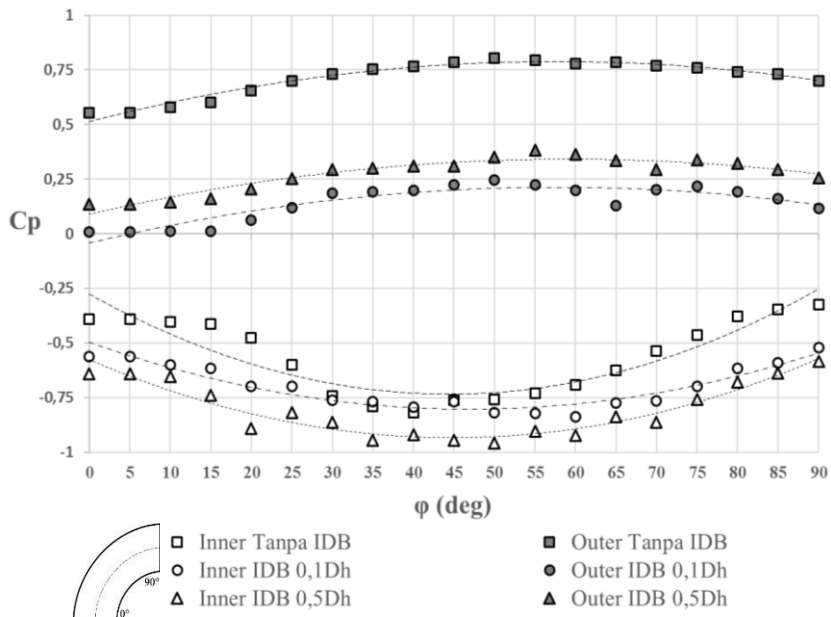
Dilihat pada gambar 4.6 menunjukkan adanya perubahan nilai *Pressure Coefficient* (C_p) di sepanjang penampang melintang baik pada *outer wall* maupun *inner wall* dari dinding kelengkungan *elbow 90°*. Kurva bagian atas menunjukkan C_p pada *outer wall* ($R_{out} = 250$ mm), dan kurva bagian bawah menunjukkan C_p pada *inner wall* ($R_{in} = 125$ mm). Dengan memasukkan nilai dari *Reynolds Number* konstan yaitu $8,74 \times 10^4$ (kecepatan udara konstan 11 m/s. Dilihat dari gambar 4.6 bahwa terdapat perbedaan nilai *Pressure Coefficient* yang cukup signifikan pada *elbow 90°* dengan saluran tanpa *inlet disturbance body* dan menggunakan *inlet disturbance body* variasi jarak $l=0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$. Perbedaan cukup signifikan tersebut terjadi pada *inner wall* maupun *outer wall elbow 90°* di setiap variasi *inlet disturbance body*. Didapatkan bahwa ΔC_p pada jarak *inlet*

disturbance body $l=0,1D_h$ terlihat lebih kecil dibandingkan pada jarak $0,5D_h$ maupun tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pressure drop yang ada pada elbow 90° dengan menggunakan *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ lebih kecil dibandingkan pada jarak $l = 0,5D_h$ maupun tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Dengan memasukan nilai Cp_{inner} dan Cp_{outer} pada setiap variasi jarak *inlet disturbance body* maupun variasi nilai *Reynolds Number*, nilai ΔCp dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut :

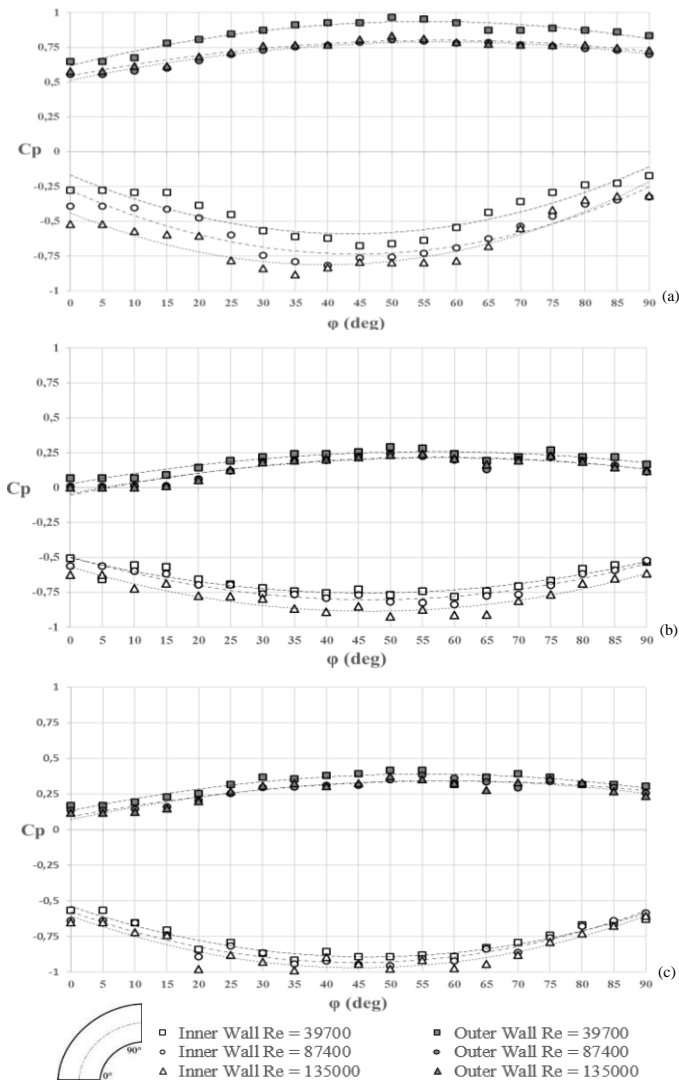
$$\Delta Cp = \Delta Cp_{outlet} - \Delta Cp_{inlet} \quad (4.3)$$

$$\Delta Cp = \left(\frac{Cp_{outer(outlet)} + Cp_{inner(outlet)}}{2} \right) - \left(\frac{Cp_{outer(inlet)} + Cp_{inner(inlet)}}{2} \right) \quad (4.4)$$

Selain itu, pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 juga dapat dilihat bahwa perbedaan tekanan maksimum pada dinding kelengkungan *elbow* 90° terjadi pada penampang melintang tepatnya pada sudut $\phi = 45^\circ$. Di sisi lain, dapat disimpulkan dari analisa bahwa aliran yang mengalir di sepanjang saluran mengalami percepatan pada daerah dekat dinding *inner wall* pada bagian awal dari dinding kelengkungan *elbow* 90° ($0^\circ < \phi < 30^\circ$). Disaat yang sama, pada daerah dekat dinding *outer wall* dari dinding kelengkungan *elbow* 90° terjadi *vortex (secondary flow)*. Setelah itu, pada daerah outlet *elbow* 90° , aliran mengalami percepatan pada daerah dekat dinding *outer wall* dan terjadi *vortex (secondary flow)* pada daerah dekat dinding *inner wall*. *Vortex (secondary flow)* tersebut mengakibatkan defisit momentum pada aliran utama (*primary flow*) yang mengalir di sepanjang saluran. Fenomena ini didapati pada semua variasi jarak *inlet disturbance body* ($l = 0,1D_h - l = 0,5D_h$) maupun tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, seperti yang terlihat pada gambar 4.6, 4.7 (a), 4.7 (b), dan 4.7 (c).



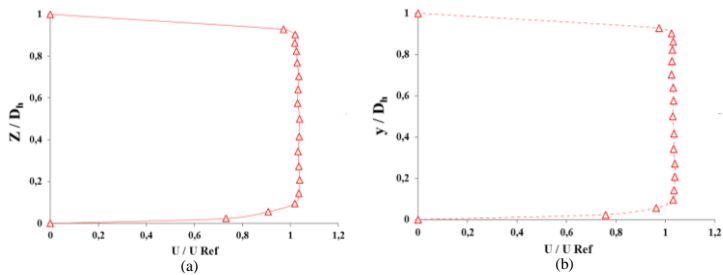
Gambar 4.6 Pressure Coefficient pada Square Elbow 90° dengan Variasi Tanpa Inlet Disturbance Body, Jarak $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ menggunakan Reynolds Number $8,74 \times 10^4$



Gambar 4.7 *Pressure Coefficient pada Square Elbow 90° Fungsi Reynolds Number dan Variasi (a) Tanpa Inlet Disturbance Body dan Variasi Jarak (b) $l = 0, 1D_h$; (c) $l = 0, 5D_h$*

4.4 Perbandingan Profil Kecepatan Bidang Horizontal dan Vertikal pada Sisi *Inlet Upstream Straight Duct*

Profil kecepatan pada sisi *upstream straight duct* digunakan sebagai acuan untuk menentukan gambaran proses *recovery* profil kecepatan daerah *downstream straight duct* pada *section* yang telah ditentukan. Pada gambar 4.8 (a) menunjukkan perilaku aliran dua pada sisi *upstream straight duct* berupa grafik *velocity profile* pada bidang horizontal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada ordinat sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan pada absis. Ordinat pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner upstream straight duct* dan $z/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer upstream straight duct*.



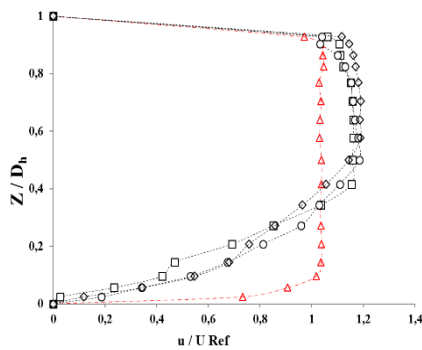
Gambar 4.8 Grafik *velocity profile* (a) bidang horizontal sisi *upstream straight duct* (b) bidang vertikal sisi *upstream straight duct*

Pada gambar 4.8 (b) menunjukkan perilaku aliran dua pada sisi *upstream straight duct* berupa grafik *velocity profile* pada bidang vertikal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada ordinat sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan pada absis. Ordinat pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $y/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *lower upstream straight duct* dan $y/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *upper upstream straight duct*.

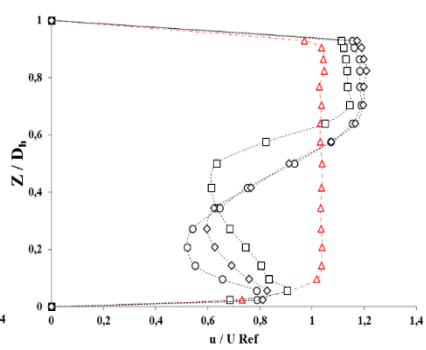
4.5 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Horizontal

Pada sub bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi *velocity profile* pada bidang horizontal beserta kontur yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran *downstream straight duct* pada bidang horizontal. Pada gambar 4.9 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight duct* berupa grafik *velocity profile* pada bidang horizontal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada ordinat sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{u}{U_{ref}}$ pada absis. Ordinat pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight duct* dan $z/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight duct*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa *inlet disturbance body* dengan variasi jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ seperti pada gambar 4.9.

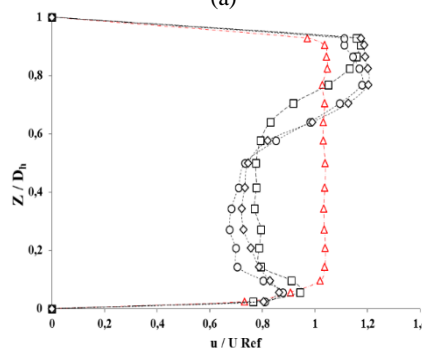
Saluran tanpa *inlet disturbance body* mempunyai *backflow* yang lebih tinggi karena titik separasi terjadi lebih awal dibandingkan saluran menggunakan *inlet disturbance body*. Hal tersebut dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan sisi *outer*, pada sisi *inner* terjadi *backflow* karena adanya daerah yang mengalami kenaikan tekanan.



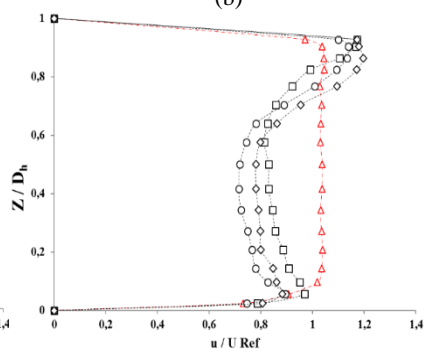
(a)



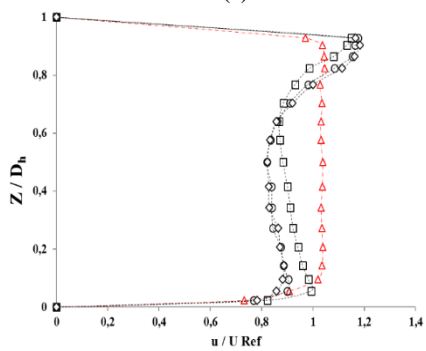
(b)



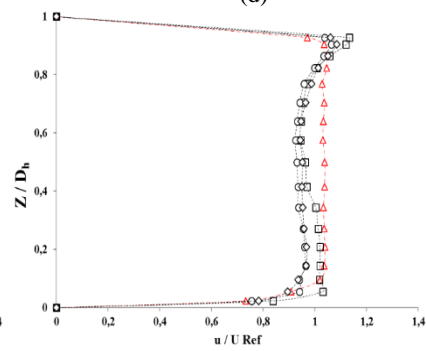
(c)



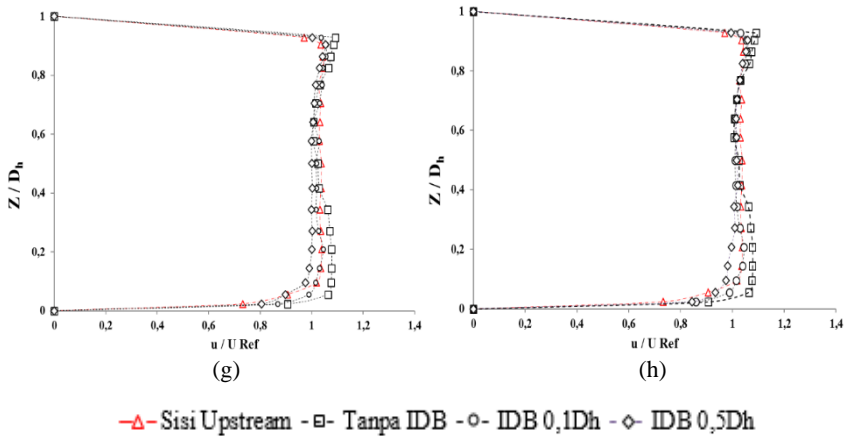
(d)



(e)



(f)



Gambar 4.9 Grafik *velocity profile* bidang horizontal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* :
 (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 13; (h) 14

Sedangkan pada saluran yang menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ mempunyai *backflow* paling rendah karena tertundanya titik separasi. Akibat radius kelengkungan pada *elbow* 90° , pada daerah sesaat memasuki *elbow* 90° terjadi kenaikan tekanan pada sisi *outer*. Hal tersebut menyebabkan tekanan pada sisi *outer* lebih besar daripada sisi *inner* sehingga terjadi *secondary flow* yang mengalir ke arah normal tangensial yang mengakibatkan adanya *blockage area* pada sisi *inner*. Oleh karena itu, sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga mempunyai kecepatan yang lebih besar. Pada *section 1* profil kecepatan tertinggi pada sisi *outer* terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,5D_h$ sedangkan profil kecepatan terendah pada sisi *outer* terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$. Pada sisi *inner* kecepatan tertinggi terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ dan kecepatan terendah terjadi pada saluran tanpa

menggunakan *inlet disturbance body*. Namun terlihat pada *section 2* yaitu gambar 4.9 (b) terdapat perubahan distribusi profil kecepatan dimana pada sisi *outer* terjadi percepatan yang cukup besar pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$, sedangkan pada *centerline* terjadi *backflow* yang kuat pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* dan pada sisi *inner* terjadi *backflow* yang cukup kuat juga pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ maupun $l = 0,5D_h$, dimana *backflow* paling kuat pada sisi *inner* terjadi pada jarak $l = 0,1D_h$. Hal tersebut disebabkan oleh adanya *inlet disturbance body* yang dipasang pada sisi *inner* cukup memberikan agitasi pada aliran yang melaluinya, dimana kecenderungan aliran akan melewati sisi yang tidak dipasang *inlet disturbance body*, yaitu sisi *outer* sehingga mengakibatkan sebagian aliran yang mengalir pada sisi *inner* berpindah menuju sisi *outer* dengan kecepatan yang tinggi. Selain itu, fenomena tersebut juga dipengaruhi oleh adanya *shear layer* (aliran yang terseparasi) dari *inlet disturbance body* yang mempunyai intensitas turbulensi yang cukup kuat untuk menambahkan momentum aliran melawan *adverse pressure* yang mengakibatkan *secondary flow* pada sisi *outer* maupun sisi *inner* dan mengurangi *blockage area* pada sisi *inner wall*. Kemudian pada *section 3* yaitu gambar 4.9 (c) terlihat bahwa *secondary flow* yang sebelumnya kuat di sisi *inner* telah merambat ke sisi *outer* seiring dengan berkurangnya kecepatan pada sisi *outer*, dengan demikian dapat dilihat terjadi *backflow* pada bagian tengah penampang (*centerline*) yang semakin membesar, hal yang sama juga didapati pada *section 4* dan *section 5* yaitu berturut - turut gambar 4.9 (d) dan gambar 4.9 (e) dimana pada sisi *outer* kecepatan tertinggi didapati pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,5D_h$, sedangkan kecepatan terendah didapati pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Pada sisi *inner* kecepatan tertinggi didapati pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, sedangkan kecepatan terendah didapati pada saluran

menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$. Setelah melewati *elbow* 90° sejauh $l = 8D_h$ terjadi *recovery* di sisi *outer*, sisi *centerline*, dan sisi *inner* baik pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* maupun menggunakan *inlet disturbance body*, seperti terlihat pada gambar 4.9 (f). Selanjutnya pada jarak $x/D_h = 13$ dan $x/D_h = 14$ dari *outlet elbow* 90° semua aliran tersebut mendekati profil kecepatan yang normal yaitu seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*. Namun terlihat pada gambar 4.9 (g) dan gambar 4.9 (h) bahwa aliran yang telah mengalami *recovery* paling baik adalah aliran yang melalui saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$, dimana aliran sudah mengalami *recovery* profil kecepatan seperti profil kecepatan bidang horizontal sisi *inlet upstream*. Dilihat pada *section 14* yaitu gambar 4.9 (h), kecepatan pada sisi *outer* pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* masih mempunyai kecepatan yang cukup tinggi melebihi kecepatan pada sisi *inlet upstream*, namun hal tersebut tidak didapati pada saluran dengan *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$. Sedangkan pada sisi *inner* terlihat bahwa aliran pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ memiliki profil kecepatan yang lebih indentik dengan profil kecepatan sisi *inlet upstream* daripada aliran pada saluran yang lain.

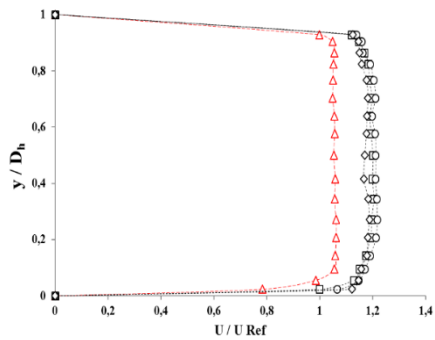
4.6 Distribusi Profil Kecepatan Bidang Vertikal

Pada sub bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi *velocity profile* pada bidang vertikal beserta kontur yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran *downstream straight duct* pada bidang vertikal. Pada gambar 4.10 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi sepanjang *downstream straight duct* berupa grafik *velocity profile* pada bidang vertikal. *Velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada ordinat sedangkan besarnya profil kecepatan ditunjukkan oleh perbandingan $\frac{u}{U_{ref}}$ pada absis. Ordinat pada grafik menunjukkan

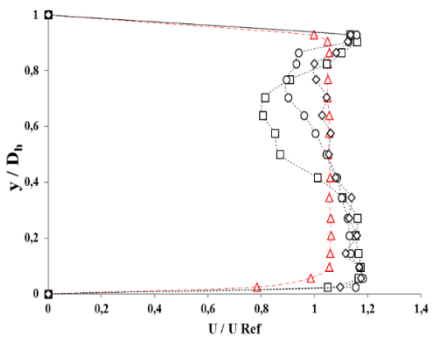
posisi titik dimana nilai $y/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight duct* dan $y/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight duct*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa *inlet disturbance body* dengan variasi jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ seperti pada gambar 4.10.

Pada gambar 4.10 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan pada bidang vertikal di sepanjang *downstream straight duct* yang dijelaskan sebagai berikut : saat meninggalkan *outlet elbow 90°*, profil kecepatan telah mengalami perkembangan distribusi kecepatan dibandingkan pada daerah *inlet upstream duct* sebelum melewati *elbow 90°* seperti pada gambar 4.10 (a) terjadi kecepatan yang lebih besar baik pada sisi *upper* maupun sisi *lower* jika daripada kecepatan pada sisi *inlet upstream duct*. Terdapat perbedaan pada *section 2* yaitu gambar 4.10 (b) dimana terjadi *backflow* pada sekitar sisi *upper* hingga sisi *centerline*. Hal tersebut terjadi karena adanya *secondary flow* sebagai akibat aliran melalui *fitting elbow 90°*. Pada *section* ini, aliran yang melalui saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* mengalami *backflow* yang kuat jika dibandingkan aliran pada saluran yang menggunakan *inlet disturbance body*.

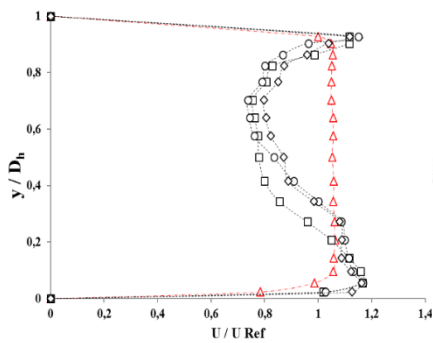
Fenomena seperti pada gambar 4.10 (a) dan (b) dapat diartikan bahwa penambahan *inlet disturbance body* sebagai bodi pengganggu pada saluran lebih efektif untuk mengurangi *blockage area* dibandingkan saluran tanpa *inlet disturbance body*. Hal yang sama juga didapati pada daerah *section 3* dan *section 4* dimana *secondary flow* pada *section* ini terlihat merambat ke daerah sisi *lower*, baik pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* maupun saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ terjadi peningkatan intensitas *backflow* yang semakin kuat, hal tersebut dapat diamati pada gambar 4.10 (c) dan gambar 4.10 (d). Namun sesaat memasuki $x/D_h = 5$, aliran sudah terlihat mengalami *recovery* aliran, seperti pada gambar 4.10 (e).



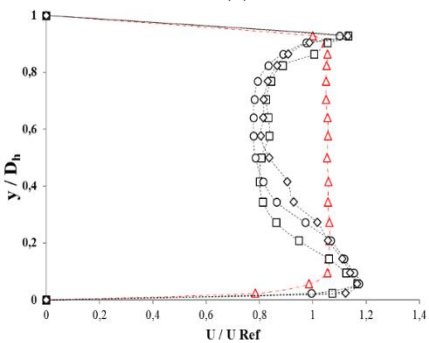
(a)



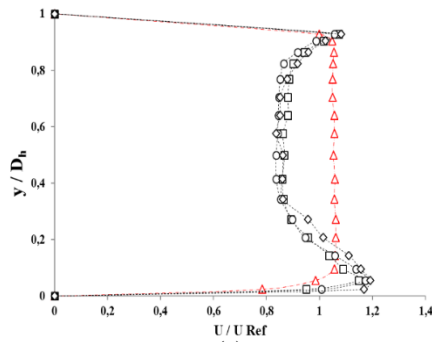
(b)



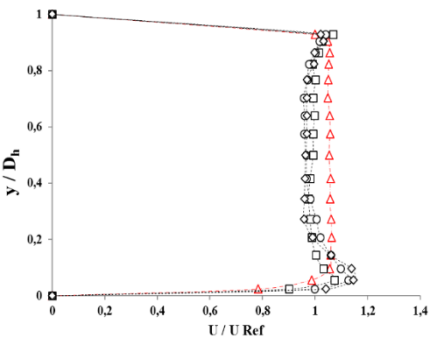
(c)



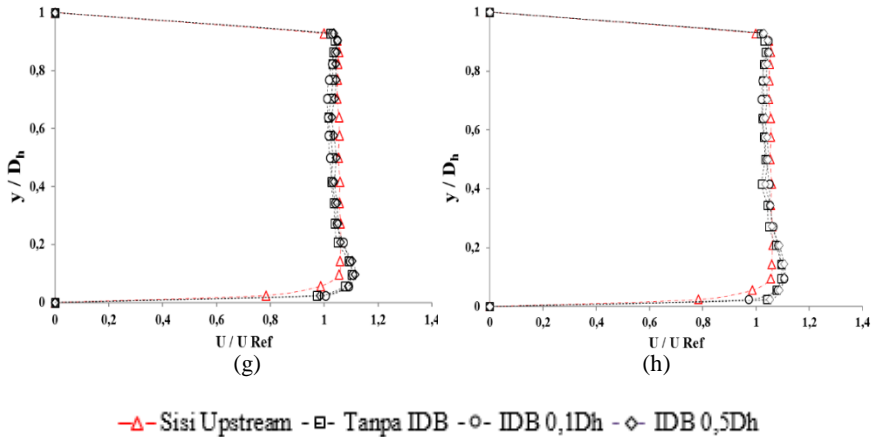
(d)



(e)



(f)



Gambar 4.10 Grafik *velocity profile* bidang vertikal pada masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan *test section* :
 (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 9; (g) 13; (h) 14

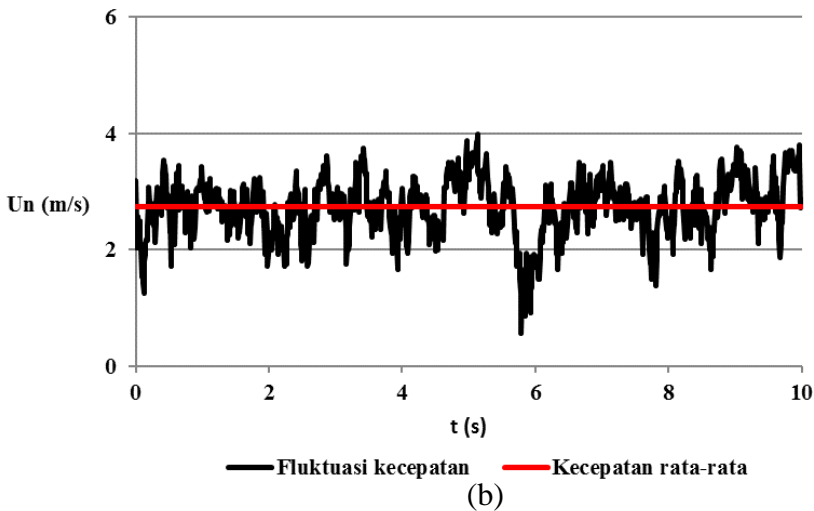
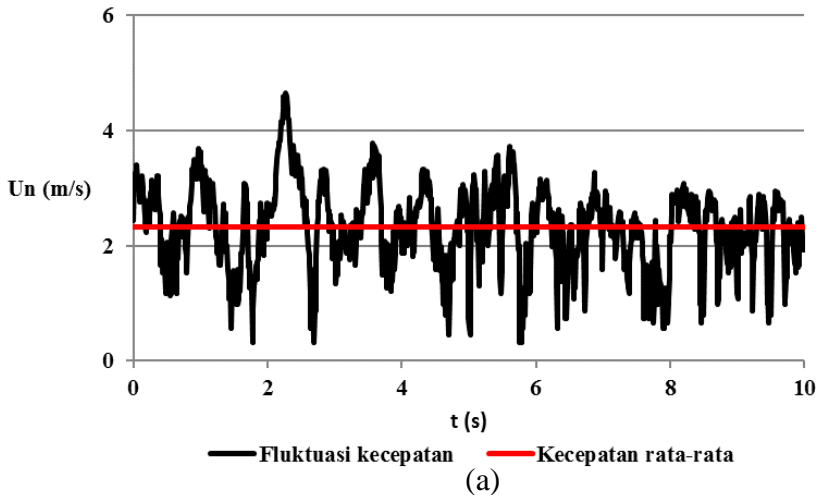
Recovery aliran bertambah semakin baik pada *section 9* atau $x/D_h = 9$, seperti pada gambar 4.10 (f) dimana pada sisi *upper* kecepatan tertinggi terjadi pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*, sedangkan kecepatan terendah terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,5D_h$. Sebaliknya, pada sisi *lower* kecepatan tertinggi terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,5D_h$, sedangkan kecepatan terendah terjadi pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Selanjutnya pada jarak $x/D_h = 13$ dan $x/D_h = 14$ setelah melalui *outlet elbow 90°* semua aliran tersebut mendekati profil kecepatan yang normal yaitu seperti profil kecepatan pada sisi *upstream*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10 (g) dan gambar 4.10 (h), dimana profil kecepatan penampang vertikal aliran tertinggi terjadi pada saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,5D_h$ dan profil kecepatan terendah terjadi pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*. Namun pada sisi *lower*, terjadi kecepatan yang masih tinggi melebihi kecepatan pada sisi

inlet upstream duct, fenomena ini terjadi pada aliran baik yang melalui saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* maupun menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$.

4.7 Intensitas Turbulensi pada Jarak $x/D_h = 1$

Pada sub bab ini menjelaskan gambaran umum distribusi *turbulent intensity* pada bidang horizontal beserta kontur yang mewakili besar intensitas turbulensi pada posisi $x/D_h = 1$ setelah *outlet elbow 90°*. Pada gambar 4.11 diperlihatkan gambar Intensitas Turbulensi fungsi z/D_h dan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi setelah melewati *elbow 90°* berupa grafik *turbulent intensity* pada bidang horizontal. *Turbulent intensity* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu pada ordinat sedangkan besarnya intensitas turbulensi ditunjukkan oleh persentase perbandingan $\frac{u'}{U_{avg}} \times 100\%$ pada absis. Ordinat pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $z/D_h = 0$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner downstream straight duct* dan $z/D_h = 1$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer downstream straight duct*. Untuk lebih detail, maka dijelaskan dalam grafik perbandingan antara tanpa *inlet disturbance body* dengan variasi jarak *inlet disturbance body* $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ seperti pada gambar 4.11.

Untuk memperoleh nilai intensitas turbulensi digunakan metode pengambilan data secara berulang pada setiap titik, atau dapat difenisikan sebagai perbandingan antara akar rata-rata dari fluktuasi kecepatan (u') terhadap kecepatan rata-rata (u_{avg}). Intensitas turbulensi 1% atau kurang dikategorikan rendah, sedangkan 10% atau lebih dikategorikan tinggi. Jika semakin tinggi fluktuasi kecepatan pada suatu titik pada selang waktu tertentu, maka nilai intensitas turbulensi yang didapatkan juga akan semakin tinggi.



Gambar 4.12 Grafik fluktuasi kecepatan bidang horizontal di daerah $x/D_h = 1$ dan $z/D_h = 0,056$ pada (a) saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ dan (b) saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body*.

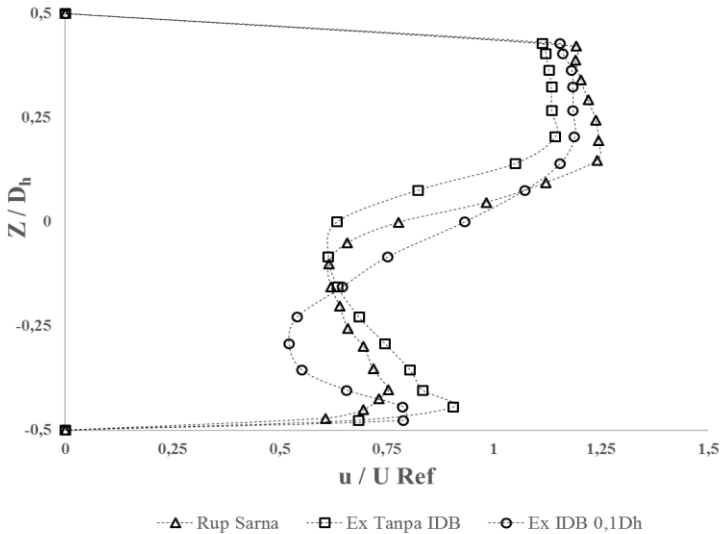
Dilihat pada gambar 4.11, didapatkan bahwa intensitas turbulensi pada daerah *outer* dan *centerline* baik pada saluran tanpa menggunakan *inlet disturbance body* maupun saluran menggunakan *inlet disturbance body* dengan variasi jarak $l = 0,1D_h$ dan $l = 0,5D_h$ memiliki nilai intensitas turbulensi yang cenderung sama atau tidak mempunyai selisih yang begitu besar. Namun berbeda pada daerah *inner* terjadi perbedaan intensitas turbulensi yang signifikan antar variasi, dimana pada $z/D_h = 0,056$ daerah *inner* terdapat intensitas yang paling tinggi jika dibandingkan dengan posisi titik pengukuran yang lain. Intensitas turbulensi tertinggi pada titik tersebut terjadi pada saluran dengan menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,1D_h$ yaitu sebesar 31,68%. Sedangkan intensitas turbulensi terendah terjadi pada saluran dengan menggunakan *inlet disturbance body* dengan jarak $l = 0,5D_h$ yaitu sebesar 8,51%. Hal ini memperkuat hipotesa awal pada eksperimen ini bahwa dengan memberikan sebuah *inlet disturbance body* pada sisi *inner upstream duct* dapat membuat intensitas turbulensi yang kuat dari *shear layer*, dimana turbulensi dari akan menambahkan momentum aliran untuk melawan *adverse pressure* pada sisi *inner wall* pada saluran, sehingga akan mengurangi *blockage area* pada sisi *inner wall*.

4.8 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Penelitian Terdahulu

Pada sub bab ini dijelaskan tentang perbedaan hasil eksperimen dengan hasil pada penelitian terdahulu yang mempunyai topik dan tujuan yang sama dalam pelaksanaan penelitiannya. Seperti pada sub bab sebelumnya, bawasannya pada sub bab ini akan diberikan distribusi profil kecepatan hasil eksperimen yang dibandingkan dengan distribusi profil kecepatan terdahulu pada posisi yang sama yaitu $x/D_h = 1$ dan juga membandingkan nilai *pressure coefficient* pada *elbow 90°*. Pada gambar 4.13 akan ditunjukkan mengenai perbedaan distribusi profil kecepatan antar hasil eksperimen dan gambar 4.13 akan ditunjukkan mengenai perbedaan nilai *pressure*

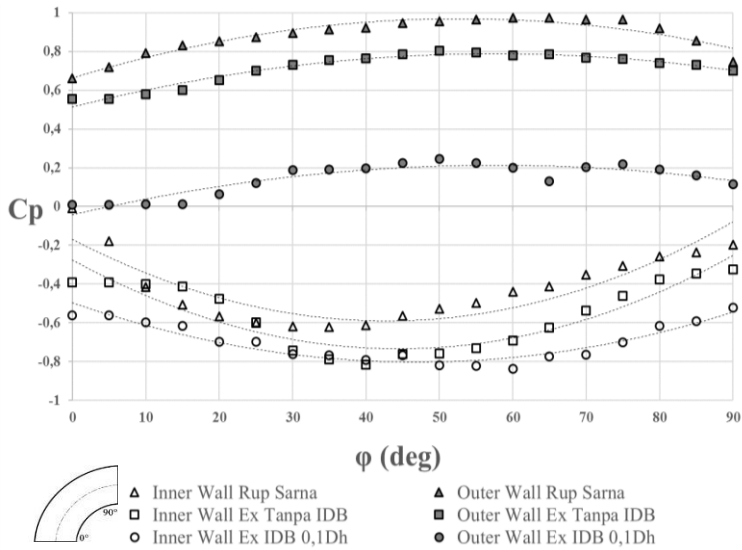
coefficient pada *elbow 90°*. Sebagai perbandingan hasil penelitian, digunakan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rup dan Sarna dimana pada penelitian yang dilakukannya memiliki tujuan yang sama yaitu untuk melihat karakteristik aliran yang melewati *square duct* dengan *elbow 90°*. Terdapat perbedaan dimensi pada instalasi penelitian dan variasi *Reynolds Number* yang digunakan antara penelitian yang terkini dengan penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna. Penelitian Rup dan Sarna menggunakan *square duct* dengan diameter hidrolik (D_h) sebesar 80 mm, rasio kelengkungan *elbow 90°* (R/D_h) sebesar 2, dan panjang *upstream* sepanjang $l = 20D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $l = 20D_h$, sedangkan pada penelitian kali ini digunakan diameter hidrolik (D_h) sebesar 125 mm, rasio kelengkungan *elbow 90°* (R/D_h) sebesar 1,5 dan panjang *upstream* sepanjang $7D_h$ serta panjang *downstream* sepanjang $l = 15D_h$.

Dapat dilihat pada gambar 4.13 bahwa terlihat bentuk distribusi kecepatan yang identik antara hasil eksperimen dengan hasil penelitian oleh Rup dan Sarna. Pada sisi *outer wall*, terjadi percepatan pada masing – masing distribusi profil kecepatan, sedangkan pada sisi *inner wall* terlihat terjadi defisit momentum akibat yang mengakibatkan *blockage area* pada sisi *inner wall*. Kecepatan aliran paling tinggi pada daerah *outer wall* terjadi pada profil kecepatan penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna, sedangkan kecepatan aliran paling tinggi pada daerah *inner wall* terjadi pada eksperimen kali ini, yaitu tanpa *inlet disturbance body*. Perbedaan distribusi profil kecepatan yang terlihat disebabkan oleh dimensi instalasi penelitian dan properti fluida yang digunakan di dalam saluran pada masing – masing penelitian. Untuk properti fluida pada eksperimen ini, pengukuran profil kecepatan menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $8,74 \times 10^4$, sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Rup dan Sarna menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $4,00 \times 10^4$.



Gambar 4.13 Grafik *velocity profile* bidang horizontal pada posisi $x/D_h = 1$ setelah *outlet elbow* 90° (Re Eksperimen = $8,74 \times 10^4$; Re Rup&Sarna = $4,00 \times 10^4$)

Hal yang sama juga terlihat pada gambar 4.14 dimana menunjukkan adanya perbedaan *pressure coefficient* antara hasil eksperimen dan hasil penelitian terdahulu oleh Rup dan Sarna. Pengukuran *pressure coefficient* yang dilakukan oleh Rup dan Sarna menggunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $9,21 \times 10^4$, sedangkan pada eksperimen digunakan nilai *Reynolds Number* sebesar $8,74 \times 10^4$. Terlihat bahwa pada gambar 4.14, nilai *pressure coefficient* pada Rup dan Sarna baik pada *inner wall* maupun *outer wall* memiliki nilai *pressure coefficient* yang lebih tinggi dibandingkan eksperimen. Namun, perbedaan nilai *pressure coefficient* (ΔC_p) antar keduanya terlihat tidak signifikan.



Gambar 4.14 *Pressure Coefficient* pada *Square Elbow 90°* antara hasil eksperimen dan hasil penelitian terdahulu oleh Rup dan Sarna (Re Eksperimen = $8,74 \times 10^4$; Re Rup&Sarna = $9,21 \times 10^4$)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian yang telah dibahas pada bab analisa dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan *IDB* menghasilkan nilai *pressure drop* yang lebih rendah dan lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*.
 - a) *Pressure Drop* terendah pada *IDB* $l = 0,1D_h$
 - b) *Pressure Drop* tertinggi pada *IDB* $l = 0,5D_h$
 - c) Penurunan *Pressure Drop IDB* $l = 0,1D_h$ sebesar 17,68% terhadap saluran tanpa *IDB*
2. Penempatan *IDB* menghasilkan nilai koefisien *losses elbow 90°* yang lebih rendah dibandingkan tanpa menggunakan *IDB*.
 - a) *Koefisien losses elbow 90°* terendah pada *IDB* $l = 0,1D_h$
 - b) *Koefisien losses elbow 90°* tertinggi pada tanpa *IDB*
 - c) Penurunan *Koefisien losses elbow 90°* sebesar 9,74% terhadap saluran tanpa *IDB*
3. ΔC_p pada jarak $l = IDB$ $0,1D_h$ terlihat lebih kecil dibandingkan pada jarak $l = 0,5D_h$ maupun tanpa menggunakan *IDB*.
 - a) ΔC_p terendah pada *IDB* $l = 0,1D_h$
 - b) ΔC_p tertinggi pada saluran tanpa *IDB*
4. Variasi jarak *IDB* $l = 0,1D_h$, $l = 0,2D_h$, $l = 0,3D_h$, $l = 0,4D_h$, dan $l = 0,5D_h$, mempengaruhi proses *recovery* dan intensitas turbulensi aliran pada saluran.
 - a) *Blockage area* pada sisi *inner outlet elbow 90°* tertinggi terjadi pada saluran tanpa *IDB* dan *blockage area* pada sisi *inner outlet elbow 90°* terendah terjadi pada saluran menggunakan *IDB* $l = 0,1D_h$.

- b) Intensitas turbulensi pada sisi *inner outlet elbow* 90° tertinggi terjadi pada saluran menggunakan $IDB\ l = 0,1D_h$ yaitu sebesar 30,92% dan nilai intensitas pada sisi *inner outlet elbow* 90° terendah terjadi pada saluran yang menggunakan $IDB\ l = 0,4D_h$ yaitu sebesar 8,07%.
- c) Variasi jarak $IDB\ l = 0,1D_h$ memiliki recovery aliran paling baik dibanding variasi yang lain.

5.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan untuk kedepannya adalah sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan keakuratan data kuantitatif dan kualitatif yang baik dan akurat pada saat pengambilan data diperlukan peralatan yang berkualitas baik dan akurat. Sehingga pembaruan dan perawatan peralatan harus dilakukan.
2. Kondisi ruangan yang stabil harus dikontrol agar data yang diperoleh baik.
3. Diperlukan adanya kajian eksperimen dengan variasi *gap* penempatan *inlet disturbance body* dan variasi diameter silinder sebagai *inlet disturbance body* pada jarak D_h tertentu dari *inlet elbow* 90° agar dapat dibandingkan hasil eksperimen fenomena aliran yang terjadi dengan pengaruh dari variasi tersebut.

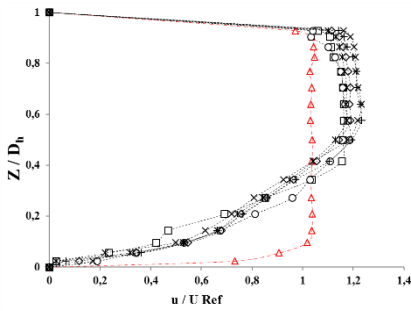
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. *Introduction to Fluid Mechanics*, 8th Edition. New York : John Wiley & Sons Inc.
- [2] Nakayama Y., dan Boucher R.F. 1998. *Introduction to Fluid Mechanics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [3] Rup, K., & Sarna, P. 2011. *Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow*. Cracow: Elsevier.
- [4] Choi, J. H. & Lee, S. J. 2010. *Ground Effect of Flow Around An Elliptic Cylinder in A Turbulent Boundary Layer*. Korea : Department of Mechanical Engineering Pohang University of Science and Technology.
- [5] Eduard, Wahyu Ramadhan . 2016. *Studi Eksperimen Aliran melalui Square Duct dan Square Elbow 90° dengan Variasi Sudut Buka dan Damper*. Tugas Akhir, Teknik Mesin ITS Surabaya.
- [6] Dutta, Prasun & Nandi, Nityananda. 2015. *Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends*. India : Department of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Indian Institute of Engineering Science and Technology, Shibpur.
- [7] Shi-Ming, Deng & Brunett. 2000. *Building Services Engineering Department*. Hongkong : The Hongkong Polytechnic University.

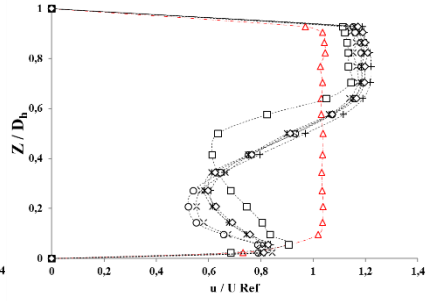
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

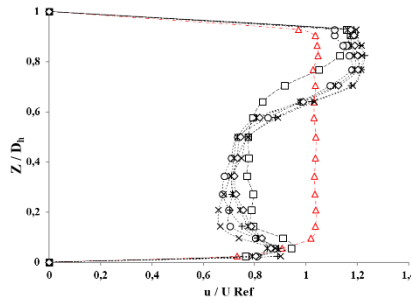
Lampiran 1. Profil Kecepatan Bidang Horizontal pada $Re_{Dh}=8,74 \times 10^4$



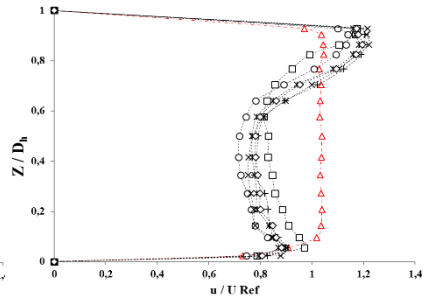
Section 1



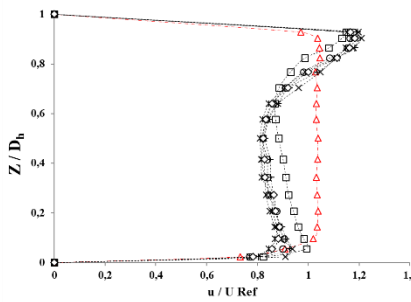
Section 2



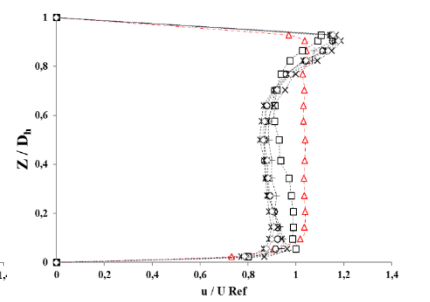
Section 3



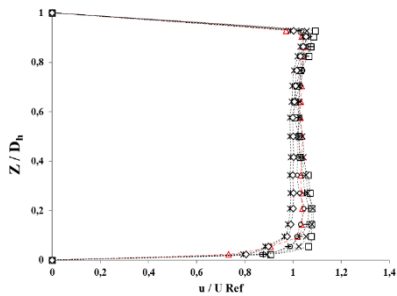
Section 4



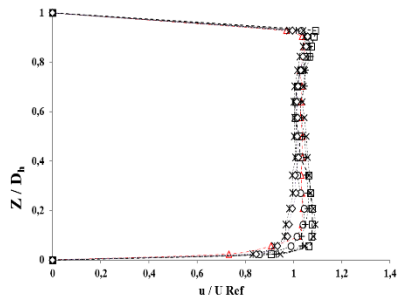
Section 5



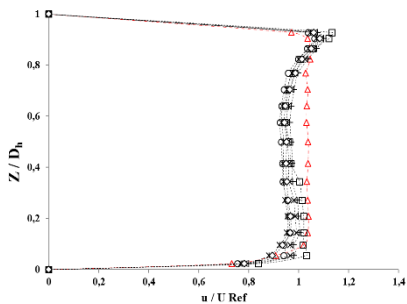
Section 6



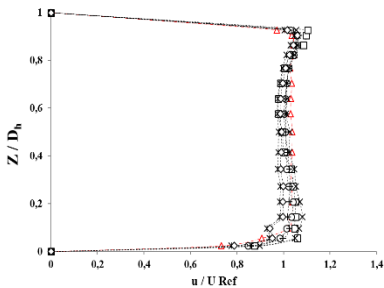
Section 9



Section 12



Section 13



Section 14

-△- Sisi Upstream

-□- Tanpa IDB

---○--- IDB 0,1Dh

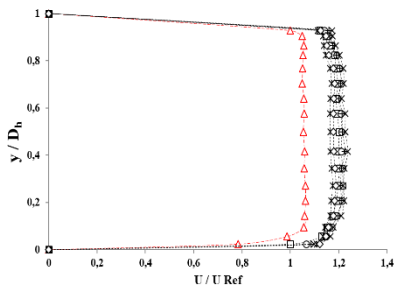
---×--- IDB 0,2Dh

---+--- IDB 0,3Dh

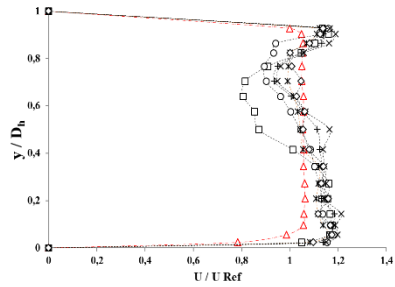
---*--- IDB 0,4Dh

---◇--- IDB 0,5Dh

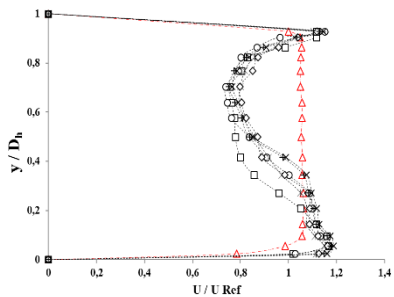
Lampiran 2. Profil Kecepatan Bidang Vertikal pada $Re_{Dh}=8,74 \times 10^4$



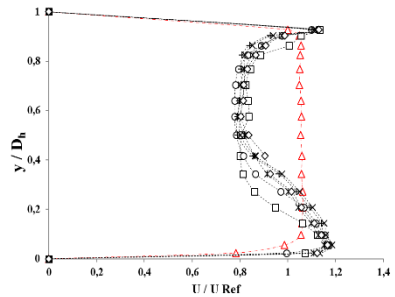
Section 1



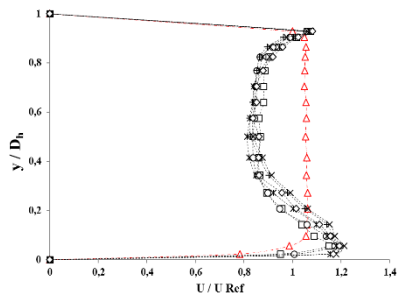
Section 2



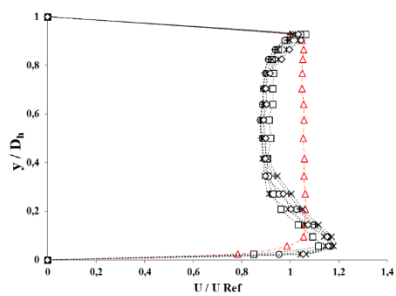
Section 3



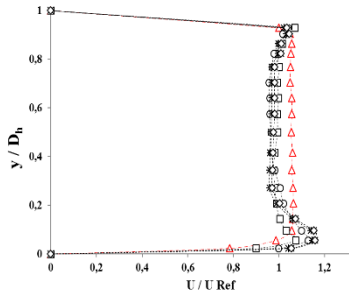
Section 4



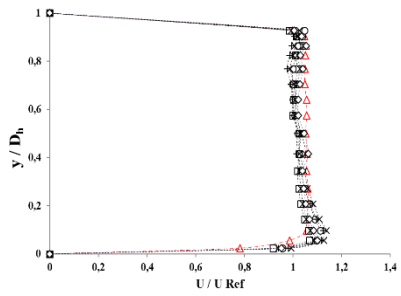
Section 5



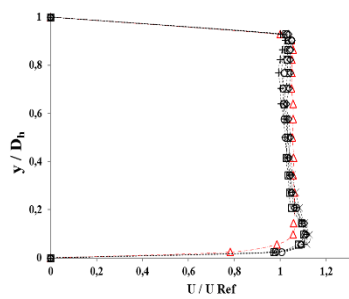
Section 6



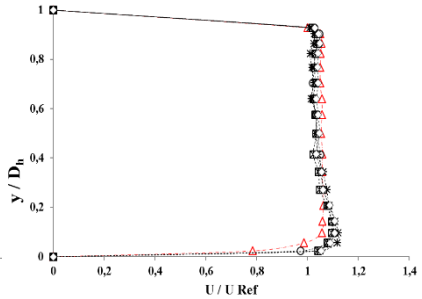
Section 9



Section 12



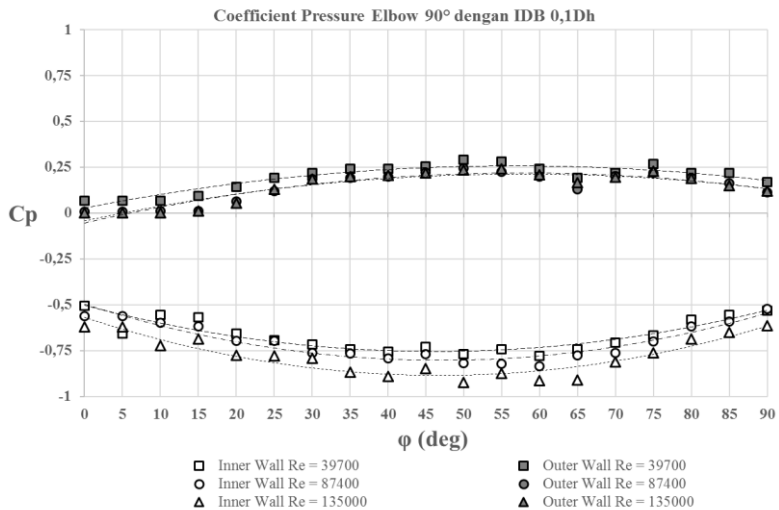
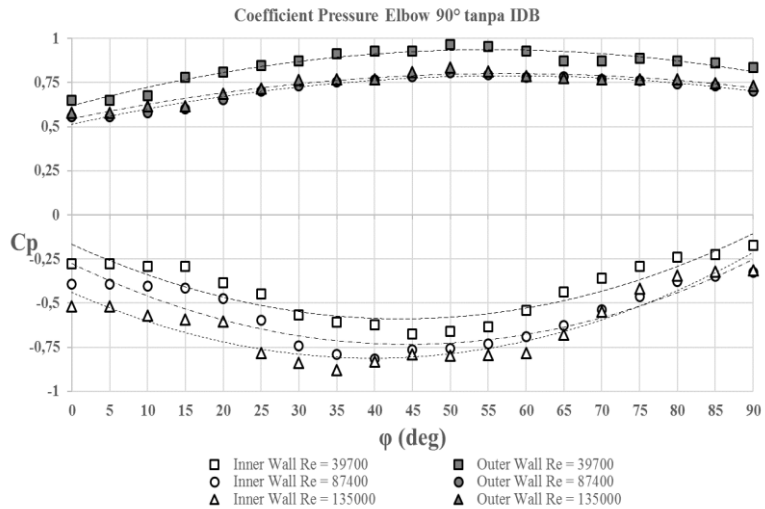
Section 13

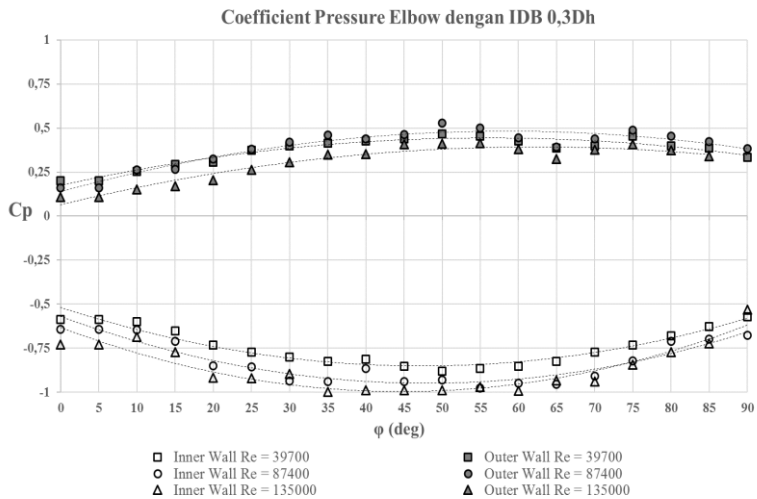
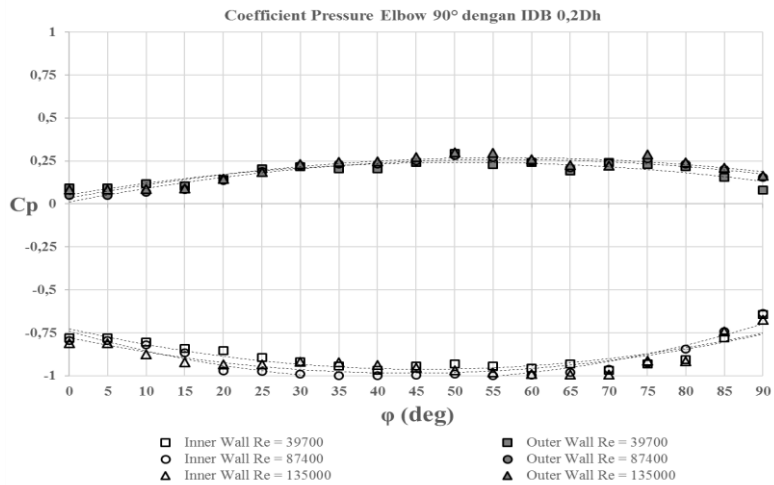


Section 14

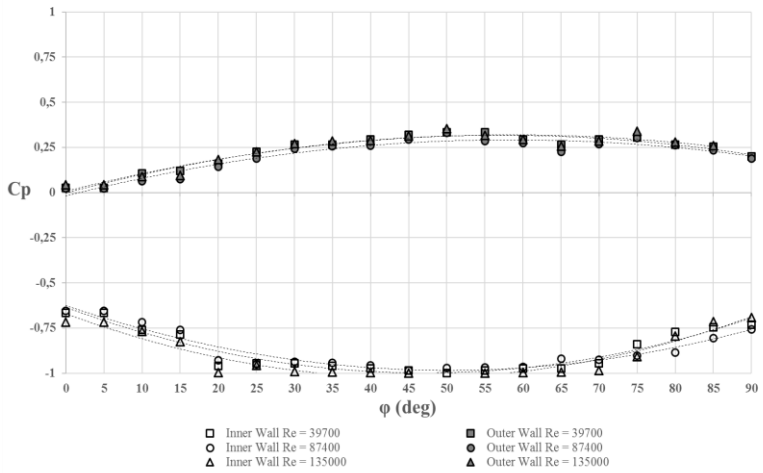
- | | | |
|-------------------|---------------|-------------|
| -△- Sisi Upstream | -□- Tanpa IDB | ○ IDB 0,1Dh |
| × IDB 0,2Dh | + IDB 0,3Dh | * IDB 0,4Dh |
| ◇ IDB 0,5Dh | | |

Lampiran 3. Pressure Coefficient Elbow 90° pada $Re_{Dh}=3,97 \times 10^4$; $8,74 \times 10^4$; dan $13,5 \times 10^4$

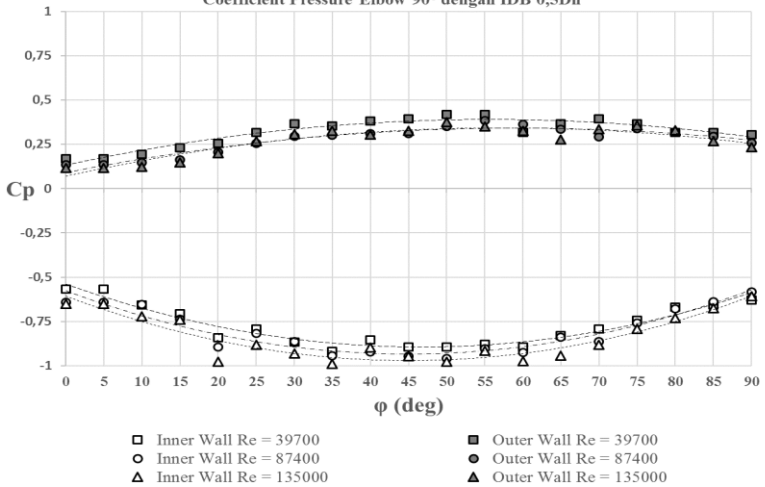




Coefficient Pressure Elbow 90° dengan IDB 0,4Dh



Coefficient Pressure Elbow 90° dengan IDB 0,5Dh



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Aqfha Hardhian S. F dilahirkan di Tuban, 6 Februari 1994 anak yang terlahir dari orang tua terbaik bernama Yudhi Hari Triwiyoso dan Sri Puji Utami. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Latsari, Tuban pada tahun 2000-2006. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 1, Tuban pada tahun 2006-2009, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMA Negeri 1, Tuban pada tahun 2009-2012. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Tulis.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Divisi Event di Mesin Music Club (MMC) ITS Surabaya pada tahun 2012-2013. Pada tahun 2014-2015, penulis aktif menjadi Ketua Umum Mesin Music Club (MMC) ITS Surabaya.

Motto hidup penulis adalah “Kemarin aku merancang, hari ini aku berjuang, esok aku menang.” menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk senantiasa memberikan manfaat dan berguna bagi agama, nusa dan bangsa. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email hardhian.aqfha@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”